СПРАВОЧНИК РАБОТНИКА ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

2-е издание, переработанное и дополненное

Авторы: М.М. Волков, А.Л. Михеев, К.А. Конев

Рецензент канд. техн. наук А.Д. Седых

ГЛАВА 1
ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВ

1.1. СРЕДНИЕ СОСТАВЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СССР

Для надежного газоснабжения потребителей, подачи им кондиционного газа на магистральных газопроводах осуществляется текущий контроль его химического состава. В табл. 1.1 представлена характеристика природных газов некоторых месторождений.

Таблица 1.1

Характеристика природных газов некоторых месторождений СССР

Месторождение: возраст	Состав газа (по объему), %								Относительная плотность по воздуху (при 20°С)	Удельная теплота сгорания (при 20°С, кДж/м^3)
	Метан CH_4	Этан C_2H_6	Пропан C_3H_8	Бутан C_4H_{10}	Пентан C_5H_{12} + высшие	Двуокись углерода CO_2	Азот N_2 + редкие	Сероводород H_2S		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Северные месторождения										
Уренгойское:										
юра	87	6,2	3,4	1,98	0,76	0,12	1,1	Нет	0,673	39000
сеноман	98,8	0,07	-	-	0,01	0,29	0,8	"	0,561	33080
Ямбургское:										
сеноман	98,6		0,07			0,19	1,12	"	0,562	33080
Медвежье:										
сеноман	99,2	0,12	-	-	0,01	0,01	0,6	"	0,558	33200
юра	63,7	10,2	12,6	7,6	3,6	0,7	1,8	"	0,76	52000

Файл скачан с www.turbinist.ru

Бованенковское:										
сеноман	99	0,028	0,007	0,003	-	0,063	0,855	Следы	0,56	33080
залежь $ТП_{1–6}$	96,4	2,89	0,05	0,03	0,01	0,22	0,43	Следы	0,565	32900
Заполярное	98,4	0,07	0,01	-	0,01	0,20	1,3	Нет	0,562	32900
Харасавейское	90-98	1-3	0,5-1,5	0,1-0,2	Следы	0,3-0,8	0,2-0,8	Следы		
Тазовское:										
сеноман	98,6	0,1	0,03	0,02	0,01	0,2	1	Нет	0,562	33100
юра	87,5	6,7	2,1	0,59	0,11	0,6	2,4	"	0,635	35600
Губкинское	98,4	0,13	0,01	0,005	0,01	0,15	1,3	"	0,573	32950
Комсомольское:										
сеноман	97,2	0,12	0,01	-	0,01	0,1	2,5	"	0,566	32550
юра	94,5	2,1	0,5	0,1	0,1	0,2	1,6	"	0,577	33500
Вынгапурское	95,1	0,32	-	-	-	0,19	4,3	Нет	0,575	31950
Юбилейное	98,4	0,07	0,01	-	-	0,4	1,1	"	0,563	32500
Месоояхское	97,6	0,1	0,03	0,01	0,01	0,06	1,6	"	0,568	32100
Березовское	94,8	1,2	0,3	0,1	0,06	0,5	3	“	0,583	32800
Вуктыльское	81,8	8,8	2,8	0,94	0,3	0,3	5,1	"	0,67	36500
Среднеазиатские месторождения										
Ачак:										
нижний мел	93,7	3,8	0,9	0,37	0,84	0,3	0,7	Нет	0,614	36000
верхняя юра	89,2	4,6	1,5	0,44	0,37	0,5	3,3	Следы	0,624	34850
Гугуртли:										
нижний мел	91,4	4,2	1,1	0,33	0,25	0,7	1,9	0,17	0,612	34800
верхняя юра	92,4	3,8	0,8	0,29	0,19	1	1,3	0,19	0,606	34450
нижняя юра	89,7	4,5	1,2	0,46	0,26	0,5	3	0,01	0,616	34550
Даулетабад-Донмез	95,14	1,55	0,28	0,17	0,26	1,22	1,38	Следы	0,575	32000
Наип	92,3	3,9	0,9	0,35	0,25	0,5	1	Следы	0,598	34600
Самантепе	88,3	2,3	0,38	0,15	0,19	5	0,5	3,2	0,647	31600
Майское	97,7	0,7	0,1	0,02	-	0,9	1	Нет	0,575	33100
Шатлык	94,6	2,2	0,27	0,2	0,18	1,4	1,2	"	0,594	33000

Файл скачан с www.turbinist.ru

Байрамали	97,3	1,2	0,1	0,1	0,01	0,5	0,9	"	0,572	33400
Газли	94,7	3,7	0,12	0,29	0,11	0,4	1,1	Следы	0,591	34400
Учкыр	92,5	4,4	1	0,33	0,12	0,3	1,1	0,02	0,6	34900
Месторождения Украинской ССР										
Шебелинское	92,2	4,1	1	0,36	0,33	0,1	2	Нет	0,607	34200
Ефремовское	93,2	3,9	0,81	0,28	0,18	0,2	1,4	"	0,597	34750
Кегичевское	93,2	3,3	1,4	0,25	0,18	0,6	1,3	Нет	0,605	33750
Солоховское	86,5	0,16	0,11	0,05	0,11	0,06	13	"	0,614	29300
Машевское	92,7	3,7	0,64	0,27	0,22	0,4	2	"	0,599	34400
Пролетарское	86,2	5,3	2,4	2	1,55	0,6	1,5	"	0,676	38550
Джанкойское	96,0	0,5	0,2	0,04	-	0,2	3	"	0,574	32550
Вергунское	84	3,4	1	0,36	0,29	1,3	9	"	0,642	31950
Месторождения различных районов										
Астраханское	50,5-61,9	0,6-5,5	0,6-1,7	0,22-0,93	-	8-20,7	0,02-0,07	20,7-33	-	-
Оренбургское	92,7	2,2	0,8	0,22	0,15	0,2	1,1	2,6	0,603	34100
Северо-Ставропольское	98,7	0,33	0,12	0,04	0,01	0,7	0,7	Нет	0,562	35800

В соответствии с условиями образования природного газа его месторождения делят на чисто газовые, газоконденсатные и нефтяные. Газы с содержанием тяжелых углеводородов (от пропана и выше) менее 50 г/м^3 принято считать сухими, а газы с большим содержанием тяжелых углеводородов - жирными.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

Плотность газа

Плотность газа ρ определяется как масса единицы объема, т. е. как отношение массы газа m к его объему V $\rho = m / V$.

Удельный объем

Удельный объем - величина, обратная плотности.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Удельным объемом газа v называется объем единицы массы газа $v = 1/\rho = V/m$.

Физическая характеристика некоторых газов представлена в табл. 1.2, 1.3.

Таблица 1.2

Физические свойства углеводородных газов

Показатель	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	н-C_4H_{10}	изо-C_4H_{10}	C_5H_{12}
Молекулярная масса	16,043	30,07	44,097	58,124	58,124	72,151
Плотность, кг/м^3:						
при 0 °С и 0,1013 МПа	0,7168	1,356	2,01	2,703	2,673	3,457
при 20 °С и 0,1013 МПа	0,6687	1,264	1,872	2,519	2,491	3,228
Относительная плотность (по воздуху)	0,555	1,049	1,554	2,091	2,067	2,674
Теплота сгорания при 0 °С и 0,1013 МПа, кДж/м^3;						
Высшая	39830	70370	100920	133890	131800	158360
низшая	35880	64430	92930	123680	121750	146230

Показатель	C_6H_{14}	C_2H_4	C_3H_6	а-C_4H_8	изо-C_4H_8	C_2H_2	C_6H_6
Молекулярная масса	86,172	28,054	42,071	56,108	56,108	26,038	78,114
Плотность, кг/м^3:							
при 0 °С и 0,1013 МПа	3,84	1,26	1,915	2,5	2,5	1,171	3,49
при 20 °С и 0,1013 МПа	3,583	1,175	1,784	2,325	2,325	1,0929	3,25
Относительная плотность (по воздуху)	2,974	0,975	1,481	1,93	1,93	0,907	2,7
Теплота сгорания при 0 °С и 0,1013 МПа, кДж/м^3:							
высшая	171790	63430	93720	123400	-	58870	150200
низшая	-	59500	87 740	115500	-	56860	143900

Таблица 1.3

Физические свойства некоторых неуглеводородных газов

Показатель	N_2	H_2	O_2	CO_2	CO

Файл скачан с www.turbinist.ru

Молекулярная масса	28,016	2,016	32	44,011	28,011
Плотность, кг/м^3:					
при 0 °С и 0,1013 МПа	1,2505	0,08999	1,429	1,9768	1,250
при 20 °С и 0,1013 МПа	1,1651	0,0837	1,3314	1,8423	1,1651
Относительная плотность (по воздуху)	0,9673	0,0695	1,1053	1,5291	0,967
Теплота сгорания при 0 °С и 0,1013 МПа, кДж/м^3:					
высшая	-	12762	-	-	12636
низшая	-	10 798	-	-	12649
Показатель	Воздух (без CO_2)	H_2S	Водяной пар	He	Ar
Молекулярная масса	28,960	34,082	18,016	4,003	39,944
Плотность, кг/м^3:					
при 0 °С и 0,1013 МПа	1,2928	1,5392	0,768	0,1785	1,7837
при 20 °С и 0,1013 МПа	1,205	1,4338	0,7519	1,1663	1,6628
Относительная плотность (по воздуху)	1	1,1906	0,624	0,1381	1,3799
Теплота сгорания при 0°С и 0,1013 МПа, кДж/м^3:					
высшая	-	25708	-	-	-
низшая	-	23698	-	-	-

Расход газа

Различают массовый и объемный расход газа. Массовым расходом газа M называется масса газа m, проходящая через поперечное сечение потока в единицу времени t $M = m/t$. Объемным расходом газа Q называется количество газа в единицах объема, проходящее через сечение потока в единицу времени $Q = V/t$.

Объем газа и объемный расход относят к определенным условиям (температура, давление): объемный расход при нормальных условиях $Q_н$ (температура 0 °С, давление 0,1013 МПа) и объемный расход газа при стандартных условиях $Q_{ст}$ (температура 20 °С, давление 0,1013 МПа).

Линейная и массовая скорость газа

Файл скачан с www.turbinist.ru

Линейная скорость газа w в газопроводе определяется как объемный расход газа Q в условиях потока (температура, давление) через единицу поперечного сечения $Fw = Q / F$.

Массовой скоростью газа u называется массовый расход газа M через единицу поперечного сечения потока F (газопровода): $u = M / F$.

Давление газа

Давление газа p в общем случае равно пределу отношения нормальной составляющей силы N к площади S, на которую действует сила: $p = \lim \frac{N}{S} = \frac{\partial N}{\partial S}$. При равномерном распределении сил давление p определяют по формуле $p = N / S$.

Для характеристики состояния газов используют понятие абсолютного давления $p_{\text{абс}}$, которое представляет собой давление газов на стенки газопроводов. Для определения результирующих усилий, приложенных к стенкам газопроводов, используют понятие избыточного давления $p_{\text{изб}}$, которое представляет собой разность между абсолютным давлением газа $p_{\text{абс}}$ и барометрическим давлением среды $p_{\text{бар}}$: $p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{бар}}$.

Работа

При выводе расчетных формул будет использовано понятие потенциальной работы. Потенциальной работой называется работа перемещения газов из области одного давления p_1 в область другого давления p_2. Элементарная потенциальная работа δW соответствует бесконечно малым изменениям давления: $\delta W = -Vdp, \quad \delta w = -(1/m)\delta W = -vdp$, где δw - элементарная удельная работа.

В условиях перемещения газа в газопроводах распределение потенциальной работы формулируется следующим образом:

$$\delta w = -\upsilon dp = \delta l_* + d(w^2/2) + gdz + \delta l_{**},$$

где l_* - удельная эффективная работа, передаваемая телам внешней системы (для газопроводов l_*=0); l_{**} - необратимые превращения работы, $l_{**} = \lambda \frac{w^2}{2} \frac{dx}{D}$, где λ - коэффициент гидравлического сопротивления, w - линейная скорость газа; x - расстояние от начала газопровода до рассматриваемой точки; D - внутренний диаметр газопровода; g - ускорение свободного падения; z - расположение рассматриваемой точки по высоте.

Из аналитического выражения потенциальной работы следует, что она затрачивается на преодоление трения газа о стенки газопровода, изменение положения газа и изменение линейной скорости газа.

Идеальные и реальные газы

Файл скачан с www.turbinist.ru

Законы, которым подчиняются идеальные газы, достаточно хорошо характеризуют поведение и свойства реальных газов только при невысоких давлениях и температурах. Законы идеальных газов тем лучше описывают свойства реальных газов, чем дальше эти газы находятся от областей насыщения и критического состояния.

Закон Бойля-Мариотта

Закон Бойля-Мариотта устанавливает зависимость между давлением и удельным объемом газа при постоянной температуре $p_1\upsilon_1 = p_2\upsilon_2 = \text{idem}$.

Закон Гей-Люссака

Закон Гей-Люссака определяет зависимость удельного объема идеального газа от температуры при постоянном давлении. Расширение газов при нагревании характеризуется следующим образом: относительное расширение идеальных газов при нагревании под неизменным давлением ($p =$ idem) прямо пропорционально повышению температуры: $(\upsilon - \upsilon_0)/\upsilon_0 = \alpha_0(t - t_0)$ при $t_0 = 0$ $\upsilon = \upsilon_0(1 + \alpha_0 t)$, где υ - удельный объем газа при температуре t и давлении p; υ_0 - удельный объем газа при нулевой температуре и том же давлении p; α_0 - температурный коэффициент объемного расширения идеальных газов при 0 °С, сохраняющий одно и то же значение при всех давлениях и одинаковый для всех идеальных газов, $\alpha_0 = 1/273{,}16 \approx 1/273{,}2$ 1/°С.

Уравнение Клапейрона

Уравнение Клапейрона (уравнение состояния) получается при сопоставлении законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Оно связывает три основные величины, характеризующие состояние газа (давление, температура и удельный объем); $p\upsilon = RT$, где p - абсолютное давление идеального газа; υ - удельный объем идеального газа; R - газовая постоянная идеального газа; T - абсолютная температура газа.

Уравнение Клапейрона может быть записано в следующем виде: $p/\rho = RT$.

При умножении обеих частей уравнения состояния на количество газа в единицах массы получим уравнение состояния для любого количества газа $pV = mRT$.

Газовая постоянная R есть работа расширения единицы количества газа (1 кг) при нагревании его на 1 °С при постоянном давлении ($\rho = \text{idem}$).

Закон Авогадро

Закон Авогадро сформулирован следующим образом: объем одного киломоля идеального газа не зависит от природы газа и определяется параметрами физического состояния газа (давление и температура).

Файл скачан с www.turbinist.ru

Киломолем, или килограмм-молекулой, называется число килограммов вещества, численно равное его молекулярной массе μ.

Объем 1 киломоля идеальных газов по уравнению Клапейрона $\overline{V} = \mu\overline{V} = \mu RT / p$. По закону Авогадро правая часть этого выражения не зависит от природы газа, поэтому произведение молекулярной массы μ, и газовой постоянной R не зависит от природы газа и является универсальной постоянной идеальных газов: $\mu R = \overline{R} = \text{const}$.

Уравнение состояния для 1 киломоля идеального газа $p\overline{V} = \overline{R}T$.

В настоящее время принята следующая расчетная величина - универсальная постоянная идеальных газов $R = 8{,}3144 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К).

Молярный объем идеальных газов в нормальных физических условиях равен $\overline{V}$ = 22,4 м^3/кмоль.

Расчетные значения удельных газовых постоянных идеальных газов определяют по универсальной газовой постоянной. Для реальных газов составлено большое число уравнений состояния. Наиболее распространено уравнение Клапейрона с поправочным коэффициентом $pV = zRT$, где z - коэффициент сжимаемости, учитывающий отклонение реальных газов от законов идеальных газов. Его определяют по графикам (рис. 1.1) в зависимости от приведенных параметров (температура и давление) газа: $\pi = p / p_{\text{кр}}$, $\tau = T / T_{\text{кр}}$, где π - приведенное давление; p - абсолютное давление газа; $p_{\text{кр}}$ - критическое давление газа; τ - приведенная температура; T - абсолютная температура газа; $T_{\text{кр}}$ - критическая температура газа.

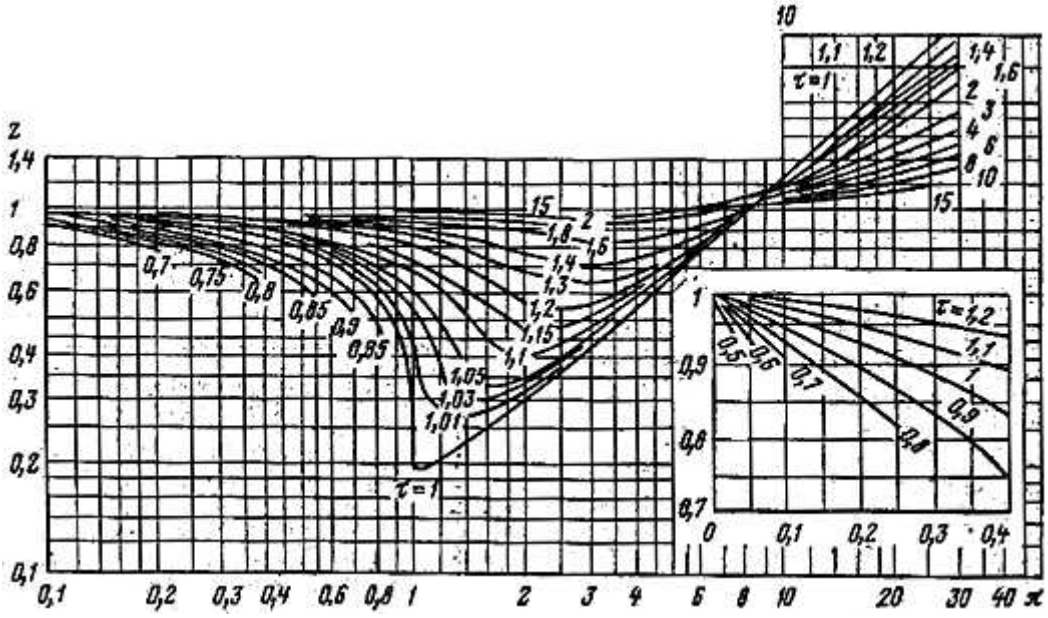


Рис. 1.1. Зависимость коэффициента сжимаемости газов z от приведенных давления $\pi = p / p_{\text{кр}}$ и температуры $\tau = T / T_{\text{кр}}$

Файл скачан с www.turbinist.ru

Критическим давлением называется такое давление, при котором и выше которого повышением температуры нельзя испарить жидкость.

Критическая температура - это такая температура, при которой и выше которой при повышении давления нельзя сконденсировать пар (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Критические параметры газов

Газ	$T_{кр}$, К	$p_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, кг/м^3
Азот	126,05	3,39	311
Аммиак	405,55	11,3	235
Аргон	150,75	4,86	531
Ацетилен	309,15	6,24	231
Бензол	561,65	4,84	304
н-Бутан	425,95	3,6	225
изо-Бутан	407,15	3,7	234
изо-Бутилен	420,35	4,06	256
Водород	33,25	1,3	31
Водяной пар	647,3	21,77	324
Воздух	132,45	3,78	335
Гелий	5,25	0,23	69,3
Гексан	38,35	3,05	234
Гептан	6,35	2,68	234
Двуокись серы	430,35	8,05	524
Двуокись углерода	304,25	7,54	468
Закись азота	309,65	7,41	450
Кислород	154,35	5,14	430
Метан	190,65	4,74	162
Окись азота	179,15	6,72	520
Окись углерода	134,15	3,62	311
изо-Пентан	460,95	3,39	234
н-Пентан	470,35	3,41	232
Пропан	368,75	4,49	226

Файл скачан с www.turbinist.ru

Пропилен	365,15	4,68	233
Сероводород	373,55	9,18	359
Этан	305,25	5,04	210
Этилен	282,85	5,26	220

Влажность газов

Транспортируемый по магистральным газопроводам газ содержит некоторое количество влаги, что приводит к коррозии трубопроводов и образованию гидратов и конденсата. Различают абсолютную и относительную влажность газа.

Абсолютная влажность газа - количество водяного пара, содержащегося в единице количества газа. Массовая абсолютная влажность $d = m_{\text{п}} / m_{\text{г}}$, где $m_{\text{п}}$ - количество водяного пара; $m_{\text{г}}$ - количество газа. Объемная абсолютная влажность $d_{\upsilon} = m_{\text{п}} / V$, где V - объем газа.

Относительной влажностью называется отношение фактически содержащегося количества водяного пара к максимально возможному при данных условиях $\varphi = m_{\text{п}} / m_{\text{s}}$, где m_{s} - максимально возможное количество пара, которое может находиться в газе при данной температуре.

Относительная влажность может быть также определена как отношение парциального давления p' водяного пара в газе к давлению p_{s} насыщенного пара при той же температуре: $\varphi = p / p_{\text{s}}$.

Газ считается насыщенным водяными парами, если парциальное давление находящихся в нем паров при данной температуре равно давлению насыщенного водяного пара, т. е насыщение $\varphi = 1$. Наибольшая температура, при которой газ насыщается водяными парами и образуются капли влаги, называется точкой росы данного газа при заданном давлении.

Смеси газов

Природные газы представляют собой смесь газов с подавляющим содержанием метана. Для термодинамических и гидравлических расчетов необходимо определять свойства смеси газов по характеристикам индивидуальных составляющих.

Массовой концентрацией m_i компонента i смеси газов называется отношение количества этого компонента в единицах массы G_i к количеству смеси G: $m_i = G_i / G$.

Количество смеси равно сумме количеств отдельных газов: $G = \sum_{i=1}^{n} G_i$.

Молярной концентрацией r_i компонента i называется отношение числа киломолей компонента $\overline{G_i}$ к числу киломолей смеси $\overline{G}$: $r_i = \overline{G_i} / \overline{G}, \overline{G_i} = G_i / \mu_i$, где μ_i - масса газа в килограмме, численно равная относительной молекулярной массе.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Сумма числа киломолей всех компонентов смеси газов равна числу киломолей смеси $\sum_{i=1}^{n}\overline{G_i}=\overline{G}$.

Сумма молярных концентраций всех компонентов смеси газа равна единице:

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i = \frac{1}{G}\sum_{i=1}^{i=n}\overline{G_i} = \frac{\overline{G}}{\overline{G}} = 1.$$

Средняя молекулярная масса смеси μ есть отношение количества смеси в единицах массы к числу молей смеси:

$$\mu = \frac{G}{\overline{G}} = \frac{1}{\overline{G}}\sum_{i=1}^{i=n} G_i = \frac{1}{\overline{G}}\sum_{i=1}^{i=n}\mu_i\overline{G_i} = \sum_{i=1}^{i=n}\mu_i\frac{\overline{G_i}}{\overline{G}} = \sum_{i=1}^{i=n}\mu_i r_i .$$

Таким образом, средняя молекулярная масса смеси газов равна сумме произведений относительной молекулярной массы на молярную концентрацию компонента:

$$\mu = \frac{G}{\overline{G}} = G\Big/\sum_{i=1}^{i=n}\overline{G_i} = G\Big/\sum_{i=1}^{i=n}\frac{G_i}{\mu_i} = 1\Big/\sum_{i=1}^{i=n}\frac{1}{\mu_i}\frac{G_i}{\overline{G}} = 1\Big/\sum_{i=1}^{i=n}\frac{m_i}{\mu_i} .$$

Средняя молекулярная масса смеси газов выражается через массовую концентрацию и относительную молекулярную массу компонентов.

Массовые и молярные концентрации находятся в следующих соотношениях:

$$\frac{m_i}{r_i} = \frac{G_i}{G}\frac{1}{\overline{G_i}/G} = \frac{G_i}{\overline{G_i}}\frac{\overline{G}}{\overline{G}} = \frac{\mu_i}{\mu};$$

$$r_i = m_i\frac{\mu}{\mu_i} = \frac{m_i/\mu_i}{\sum_{i=1}^{i=n}(m_i/\mu_i)}.$$

Объемной концентрацией $r_{i\upsilon}$ называется отношение объема компонента $V_{i(pt)}$ при давлении и температура смеси газа к объему смеси $V_{(pt)}$:

$$r_{i(\upsilon)} = \frac{V_{i(pt)}}{V_{(pt)}}$$

Молярные концентрации компонентов смесей идеальных газов тождественны объемным концентрациям.

Объемные концентрации компонентов смеси газов

$$r_{i(v)} = p_i / p_m ,$$

где p_i - парциальное давление газа; p_m - давление смеси.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Горение газов

Теплота сгорания - количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании определенного объема или массы газа. Минимальное количество кислорода или воздуха, необходимого для полного сгорания, а также теоретический состав продуктов сгорания (CO_2, H_2O, N_2) приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Минимальное количество кислорода или воздуха, необходимое для полного сгорания газов, и продукты сгорания (в $м^3$ на 1 $м^3$)

Газ	Кислород	Воздух	CO_2	H_2O	N_2
Ацетилен	2,5	11,9	2	1	9,4
Бутан	6,5	30,95	4	5	24,45
Бутилен	6	28,58	4	4	22,58
Водород	0,5	2,38	-	1	1,88
Метан	2	9,52	1	2	7,52
Окись углерода	0,5	2,38	1	-	1,88
Пропан	5	23,8	3	4	18,8
Пропилен	4,5	21,43	3	3	16,93
Этан	3,5	16,67	2	3	13,17
Этилен	3	14,29	2	2	11,29

Примечание. Воздух с содержанием 21 % O_2 и 79 % N_2.

Температура пламени при горении газа в смеси с воздухом и кислородом приведена в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Наивысшая температура пламени различных газов

Горючий газ	Содержание газа в смеси с воздухом, % (по объему)	Температура пламени, °С
Аммиак	21	1700
Ацетилен	9	2325
н-Бутан	3,2	1895
изо-Бутан	3,2	1900

Файл скачан с www.turbinist.ru

Бутилен	3,4	1930
Водород	31,6	2045
Метан	10	1830
Окись углерода	20	1650
	25	1930
	32	2100
	45	1850
Пропан	4,15	1925
Пропилен	4,5	1935
Этан	5,8	1895
Этилен	7	1975

Скорость распространения пламени (в см/с) различных газов в смеси с воздухом

Ацетилен	131
Водород	267
Метан	35
Окись углерода	33
Пропан	32

При постепенном уменьшении или увеличении концентрации горючих компонентов в газовоздушной смеси достигается такая низшая или высшая их концентрация, при которой может происходить реакция горения. Высший и низший концентрационные пределы взрываемости газов в смеси с воздухом приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Концентрационные пределы взрываемости газов в смеси с воздухом при температуре окружающей среды 20 °С и 0,1013 МПа

Газ	Концентрационные пределы взрываемости газов, % (по объему)	
	нижний	верхний
Ацетилен	1,95	82
н-Бутан	1,5	8,5
изо-Бутан	1,9	8,5
Бутадиен	2	11,5

Файл скачан с www.turbinist.ru

Бутилен	1,65	9,95
Водород	4	75
Метан	5	15,2
Окись углерода	12,5	75
Пентан	1,1	8
Пропан	2,1	9,5
Пропилен	2	15,7
Сероводород	4,3	45,5
Этан	2,5	15
Этилен	2,5	34

Концентрационный предел взрываемости смеси газов

$$L = \frac{1}{\sum_{s=1}^{n} (r_s / l_s)},$$

где L - низший (высший) предел взрываемости смеси газов; r_s - объемные концентрации газов в смеси; l_s - низший (высший) предел взрываемости каждого отдельного газа.

Газопроводы и аппараты после ремонта, а также вновь вводимые в эксплуатацию отводы продувают газом для вытеснения из них воздуха. Газ подается в газопровод осторожно с давлением менее 0,1 МПа. Для определения момента окончания вытеснения воздуха отбирают пробу газовоздушной смеси, после чего определяют содержание в ней кислорода. Вытеснение воздуха считается законченным, когда содержание кислорода в газе менее 1 %.

Для газа, пределы взрываемости которого равны 5-15 %, опасная концентрация кислорода составляет 17,8-20 % (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Концентрация газа в газовоздушной смеси в зависимости от содержания кислорода

Содержание кислорода, %	Концентрация газа в газовоздушной смеси, %
1	95,24
2	90,48
3	85,72
4	80,96

Файл скачан с www.turbinist.ru

5		76,2	
6		71,44	
7		66,68	
8		61,92	
9		57,16	
10		52,4	
11		47,64	
12		42,88	
13		38,12	
14		33,36	
15		28,6	
16		23,84	
17		19,08	
17,2		18,13	
17,4		17,18	
17,6		16,22	
17,8 18 19 20 21	Взрывчатая смесь	15,27 14,32 9,56 4,8 0,04	Взрывчатая смесь

Теплота сгорания газов

Для определения состава природного газа лабораториями газовой промышленности используется хроматографический метод анализа. Хроматографы имеют детектор по теплопроводности и аналогичные параметры: чувствительность, точность, время анализа. С помощью этих приборов определяют углеводородные и неуглеводородные компоненты природного газа. Они служат для непрерывного контроля за химическим составом потоков газа. Результаты анализов записываются регистратором прибора в виде следующих одна за другой хроматограмм. Такая информация о составе контролируемой газовой смеси дает возможность своевременно обнаружить изменения в ее составе и в случае необходимости принять соответствующие меры. Ввиду того, что качественный состав, как правило, известен, то необходимо следить лишь за количественным изменением характерных компонентов, показателем чего служат высоты их пиков на хроматограммах.

Теплота сгорания, теплотворная способность, калорийность - понятия равнозначные, характеризующие качество газа при использовании его как топлива.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Высшей теплотой сгорания $Q_{в}$ называется количество теплоты (в кДж), выделяющееся при полном сгорании единицы объема сухого газа, измеренного при нормальных или стандартных условиях, сюда входит и теплота конденсации водяных паров.

Низшей теплотой сгорания $Q_{н}$ называется количество теплоты (в кДж), выделяющееся при полном сгорании единицы объема сухого газа, измеренного при нормальных или стандартных условиях, за вычетом теплоты конденсации водяных паров.

Газы, не содержащие в своем составе водород, имеют только одну теплоту сгорания.

Оптовые цены промышленности установлены при расчетной калорийности $Q_{нр}$, равной 34333.4 ± 418,7 кДж/м^3. Пересчет на фактическую калорийность выполняют по формуле $Q_{нр} = ЦQ_{нрфакт} / 34333,4$, где $Ц$ - цена по прейскуранту; $Q_{нр}$ - фактическая низшая калорийность, кДж/м^3.

При анализах, не связанных с коммерческими расчетами допускается устанавливать теплоту сгорания газа расчетным путем по химическому составу, определенному с помощью хроматографов разных марок.

Расчет по составу газа проводится по формуле

$$Q_{н} = q_1 \frac{k_1}{100} + q_2 \frac{k_2}{100} + \ldots + q_n \frac{k_n}{100},$$

где $q_{1,2,\ldots,n}$ - теплота сгорания чистых компонентов; $k_{1,2,\ldots,n}$ - процентный объем компонентов смеси.

Пример 1.1. Определить низшую теплоту сгорания смеси газов при нормальных условиях, имеющих определенное процентное содержание (см. табл. 1.2, 1.3).

Решение

$$\begin{aligned} Q_{н} = {} & CH_4 \cdot 35880 + C_2H_6 \cdot 64430 + C_3H_8 \cdot 92930 + н\text{-}C_4H_{10} \times \\ & \times 123680 + изо\cdot C_4H_{10} \cdot 121750 + C_5H_{12} \cdot 146230 + H_2 \cdot 10798 + \\ & + CO \cdot 12649 + H_2S \cdot 23698 + C_2H_2 \cdot 56860 + C_2H_4 \cdot 59500 + C_3H_6 \times \\ & \times 87740 + а\text{-}C_4H_8 \cdot 115500 + C_6H_6 \cdot 143900, кДж/м^3, \end{aligned}$$

где буквенные формулы - компоненты смеси газов, %.

Пересчет теплоты сгорания газа от нормальных условий к стандартным проводится по формуле

$$Q_{(20°C)} = Q_{(0°C)} \frac{273}{273 + 20} = Q_{(0°C)} \cdot 0,932.$$

Согласно требованиям ОНТП-51-85 Мингазпрома СССР номинальная низшая теплота сгорания топливного газа принимается равной 34 541 Дж/м^3.

Файл скачан с www.turbinist.ru

ГЛАВА 2
ПОКАЗАТЕЛИ ТРАНСПОРТА ГАЗА

Некоторые технико-экономические показатели транспорта газа приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Технические показатели магистральных газопроводов с КС, оснащенных различными газоперекачивающими агрегатами (ГПА)

Условный диаметр газопровода, мм	Расстояние между КС, км	Степень сжатия	Пропускная способность газопровода		Установленная рабочая мощность, тыс. кВт	Газоперекачивающие агрегаты		Число ГПА на КС, рабочие+резервные
			годовая, млрд. м^3	суточная, млн. м^3		тип нагнетателя	тип привода	
При $p_{раб}$ = 5,39 МПа								
700	80-120	1,45-1,55	4,5-4,0	13,7-12	8	280-11-1	СТД-4000-2	2+1*
800	80-100	1,45-1,52	6,4-6	19,3-18	12	370-14-1	ГТК-6	2+1*
	75	1,6	7,1	21,5	16	280-11-1	СТД-4000-2	4+1
1000	80-120	1,45-1,55	11,1-9,7	33,7-29,4	20	520-12-1	ГТК-10	2+1*
	115	1,55	9,9	30	20	520-12-1	СТЛ-12500	2+1
	70	1,5	12,2	37	24	370-14-1	ГТК-6	4+2
	70	1,5	12,2	37	24	280-11-1	СТД-4000-2	6+2
	70	1,5	12,2	37	25	ГПА-Ц-6,3	-	4+1
1200	90-130	1,46-1,55	17-15	51-45	32	Н-16-56	ГТК-16	2+1
	140	1,45	13,5	41	24	370-14-1	ГТК-6	4+2*
	125-130	1,66-1,70	16	48	40	520-12-1	ГТК-10	4+2
	80	1,56	18,8	57	40	520-12-1	СТД-12500	4+1
	135	1,5	14,5	44	31,5	ГПА-Ц-6,3	-	5+2*
При $p_{раб}$ = 7,35 МПа								
1000	130	1,45	11,8	35,8	20	370-18-1	ГТК-10	2+1*
	150	1,5	11,2	34,2	20	370-18-1	ГТК-10	2+1
	180	1,55	10,5	32	20	370-18-1	ГТК-10	2+1
1200	100	1,45	21,4	65	40	370-18-1	ГТК-10	4+2*

Файл скачан с www.turbinist.ru

	120	1,45	19,1	58	32	Н-16-75	ГТК-16	2+1
	160	1,5	17,5	53	32	Н-16-75	ГТК-16	2+1
1400	125-160	1,45	28,2-25,9	85,5-78,5	50	Н-25-75	ГТК-25	2+1
	125	1,54	30	91	60	370-18-1	ГТК-10	6+3*
	95-100	1,31	28	85	32	Н-16-75	ГТК-16	2+1
	120	1,54	30	91	64	Н-16-75	ГПА-Ц-16	3+1

Примечания: 1. Пропускная способность газопроводов определена при средней температуре транспортируемого газа $T_{ср}$ = 40 °С и коэффициенте использования мощности газопровода k =0,9, 2. Звездочкой отмечены варианты оснащения КС, которые учтены в комплексной стоимости 1 км магистрального газопровода.

Удельные капитальные вложения в строительство 1 км газопровода представлены в табл. 2.2, суммарных затрат на сооружение КС - в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Удельные капитальные вложения (в тыс. руб.) в строительство 1 км магистральных газопроводов

Условный диаметр газопровода, мм	Рабочее давление, МПа	Структура затрат	Промстроительство				Непроизводственное строительство
			Всего	Линейная часть	КС	Инфра-структура и прочие сооружения	
КС с газотурбинным приводом							
1000	5,5	Всего	326 ----- 271	211 ----- 193	92 ----- 70	23 ----- 8	21,8 ----- 5,1
		В т. ч. СМР	249 ----- 208	183 ----- 171	52 ----- 34	14 ----- 3	19,7 ----- 4,6
1200	5,5	Всего	458 ----- 388	286 ----- 262	138 ----- 113	34 ----- 13	22,1 ----- 5,1
		В т. ч. СМР	334 ----- 286	249 ----- 235	66 ----- 47	19 ----- 4	20 ----- 4,6
1200	7,5	Всего	540 ----- 463	365 ----- 337	139 ----- 112	36 ----- 14	22,1 ----- 5,1
		В т. ч.	366	282	65	19	20

Файл скачан с www.turbinist.ru

		СМР	----- 316	----- 265	----- 47	----- 4	----- 4,6
1400	7,5	Всего	740 ----- 662	515 ----- 484	185 ----- 159	48 ----- 19	22,1 ----- 5,1
		В т. ч. СМР	542 ----- 484	434 ----- 415	83 ----- 64	25 ----- 5	20 ----- 4,6
1400	10	Всего	745 ----- 674	697 ----- 654	-	48 ----- 20	-
		В т. ч. СМР	604 ----- 560	579 ----- 555	-	25 ----- 5	-
КС с электроприводными агрегатами							
1000	5,5	Всего	340 ----- 267	211 ----- 193	86 ----- 62	43 ----- 12	19,7 ----- 4,6
		В т. ч. СМР	267 ----- 217	183 ----- 171	59 ----- 41	25 ----- 5	17,8 ----- 4,1
1200	5,5	Всего	456 ----- 363	286 ----- 262	108 ----- 83	62 ----- 18	19,9 ----- 5,6
		В т. ч. СМР	353 ----- 293	249 ----- 235	69 ----- 50	35 ----- 8	18 ----- 4,1
1200	7,5	Всего	551 ----- 450	365 ----- 337	119 ----- 93	67 ----- 20	19,9 ----- 5,6
		В т. ч. СМР	389 ----- 323	282 ----- 265	70 ----- 50	37 ----- 8	18 ----- 4,1
1400	7,5	Всего	742 ----- 622	515 ----- 484	139 ----- 111	88 ----- 27	1,9 ----- 5,6
		В т. ч. СМР	561 ----- 483	434 ----- 415	79 ----- 58	48 ----- 10	18 ----- 4,1

Примечание. В числителе приведены показатели (в тыс. руб.) для первой нитки газопровода, в знаменателе - для второй и последующей.

Таблица 2.3

Файл скачан с www.turbinist.ru

Капитальные вложения при сооружении КС

Условный диаметр газопровода, мм	Рабочее давление, МПа	Тип агрегата	Число агрегато в на 1 КС	Капитальные вложения		Капитальные вложения по КС на 1 км газопровода, тыс. руб.		Капитальные вложения на 1 агрегат сверх или менее принятого, тыс. руб.	
				Всего	В т.ч. СМР	Всего	Поправка на усредненную стоимость	Всего	В т.ч. СМР
КС с газотурбинным приводом									
1000	5,5	ГПА-Ц-6,3	5	11482 ----- 8713	6557 ----- 4312	92 ----- 70		962	211
1200	5,5	ГТК-10-4	5	17170 ----- 14180	9014 ----- 6623	137 ----- 113	0,99 ----- 1	1537	455
		ГТК-10-1	5	18720 ----- 15552	8123 ----- 5793	150 ----- 124	1,09 ----- 1,1	1913	310
		ГТ-6-750	6	13607 ----- 10800	8491 ----- 6173	109 ----- 86	0,79 ----- 0,76	1144	537
		ГТН-6	6	15547 ----- 12594	8235 ----- 5880	124 ----- 101	0,9 ----- 0,89	1720	634
		ГПА-Ц-6,3	6	14268 ----- 11297	7443 ----- 5137	114 ----- 90	10,83 ----- 0,8	969	211
	7,5	ГТК-10-4	6	19645 ----- 16509	9804 ----- 7364	157 ----- 132	1,13 ----- 1,18	1647	557
		ГТН-16	3	16091 ----- 13076	8162 ----- 5832	129 ----- 105	0,93 ----- 0,94	2997	952
		ГПК-10-1	6	21537 ----- 18268	8800 ----- 6434	172 ----- 146	1,24 ----- 1,3	2121	427
		ГПА-Ц-16	3	15908 ----- 12360	7674 ----- 5344	127 ----- 99	0,91 ----- 0,8	2973	830
1400	7,5	ГТН-16	5	24084 ----- 20929	11193 ----- 8745	193 ----- 167	1,04 ----- 1,05	3003	959
		ГПА-Ц-16	5	23936 ----- 20682	10455 ----- 8007	191 ----- 165	1,03 ----- 1,04	2979	836

Файл скачан с www.turbinist.ru

		ГТН-25	3	22370 ----- 19063	10174 ----- 7726	179 ----- 153	0,97 ----- 0,96	3995	732
КС с электроприводными агрегатами									
1000	5,5	СТД-4000	8	10776 ----- 7805	7405 ----- 5136	86 ----- 82	-	426	232
1200	5,5	СТД-4000	10	13510 ----- 10376	7405 ----- 6210	86 ----- 83	-	426	232
	7,5	СТД-12500	5	14915 ----- 11569	8757 ----- 6281	119 ----- 93	-	1029	536
1400	7,5	СТД-12500	7	17353 ----- 13868	9856 ----- 7248	139 ----- 111	-	1036	536

Примечания: 1. В числителе приведены показатели для первой нитки газопровода, в знаменателе - для второй и последующей. 2. Показатели определены исходя из расстояния между КС 125 км.

ГЛАВА 3
ПОДГОТОВКА ГАЗА К ТРАНСПОРТУ

3.1. ОЧИСТКА ГАЗА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Содержание механических примесей в газе не должно превышать 5 мг/м^3. Для очистки газа от механических примесей применяют масляные пылеуловители и циклонные сепараторы. Масляные пылеуловители (рис. 3.1) можно использовать в качестве сепараторов на установках, где вместе с газом поступают взвешенные капли конденсата углеводородов и влаги. На вновь вводимых компрессорных станциях очистку газа осуществляют чаще с помощью циклонных сепараторов различных типов. Схема установки очистки масла от пыли масляными пылеуловителями изображена на рис. 3.2. Чистое масло подается насосом или передавливается газом. При передавливании масла газ редуцируют и подают в емкость с давлением не выше 0,05 МПа.

Файл скачан с www.turbinist.ru

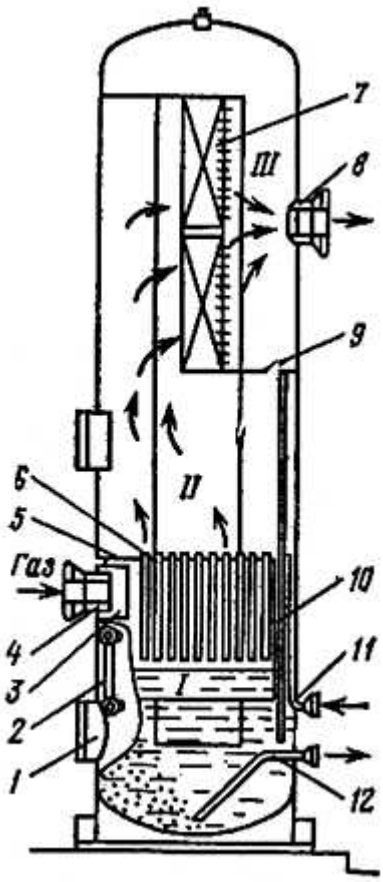


Рис. 3.1. Масляный пылеуловитель:

1 - люк; 2 - указатель уровня; 3 - козырек; 4 - подводящий патрубок; 5 и 9 - перегородки; 6 - контактные трубки; 7 - жалюзийные секции; 8 - выходной патрубок; 10 - дренажные трубки; 11 - подводящий патрубок чистого масла; 12 - дренажная трубка;
I - промывочная секция; II - осадительная секция; III - отбойная секция

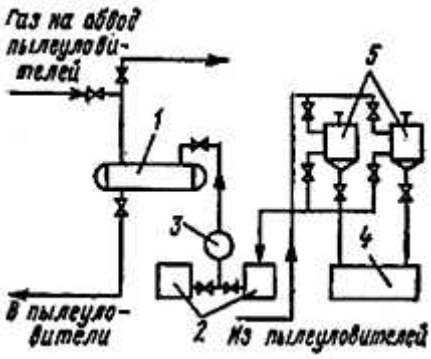


Рис. 3.2. Схема установки очистки масла для пылеуловителей:

1 - аккумулятор масла; 3 - емкости чистого масла; 3 - насос;
4 - емкость грязного масла; 5 - отстойники

Полную очистку пылеуловителя через люк проводят 2-3 раза в год. Пропускную способность масляных пылеуловителей рассчитывают в зависимости от давления и допустимых скоростей в

Файл скачан с www.turbinist.ru

сепарационных узлах. Рекомендуемые скорости в пылеуловителях с жалюзийной скрубберной насадкой следует принимать по табл. 3.1. Приведенным скоростям газа в пылеуловителях соответствует норма уноса солярового масла, равная 25 г на 1000 м^3 очищаемого газа.

Таблица 3.1

Допустимые скорости газа в сепарационных узлах масляного пылеуловителя с жалюзийной скрубберной секцией

Давление газа, МПа	Скорость газа, м/с		
	набегания на жалюзи	в свободном сечении	в контактных трубках
1	0,628	1,12	3,35
2	0,445	0,79	2,35
3	0,365	0,65	1,95
4	0,314	0,56	1,68
5	0,282	0,5	1,5
6	0,257	0,46	1,38
7	0,238	0,43	1,27

Примечание. Допустимые скорости газа в сепарационных узлах рассчитаны для системы газ - соляровое масло при температуре газа 293 К. Коэффициент сжимаемости равен единице.

Пропускная способность пылеуловителя

$$Q_{ст} = 0{,}947 \cdot 10^5 \frac{D^2 p(\rho_ж - \rho_г)}{T\rho_г};$$

$$Q_н = Q_{ст} T_н / T_{ст}$$

где $Q_{ст}$ и $Q_н$ - пропускная способность пылеуловителя соответственно при 0 °С и 0,1013 МПа и при 20 °С и 0,1013 МПа, м^3/сут; D - внутренний диаметр пылеуловителя, м; p - рабочее давление в пылеуловителе, МПа; T - температура газа в пылеуловителе, К; $\rho_ж$ - плотность масла, кг/м^3; $\rho_г$ - плотность газа, кг/м^3.

На рис 3.3 изображена зависимость пропускной способности пылеуловителей от их диаметра и давления газа. Техническая характеристика масляных пылеуловителей приведена в табл. 3.2.

Файл скачан с www.turbinist.ru

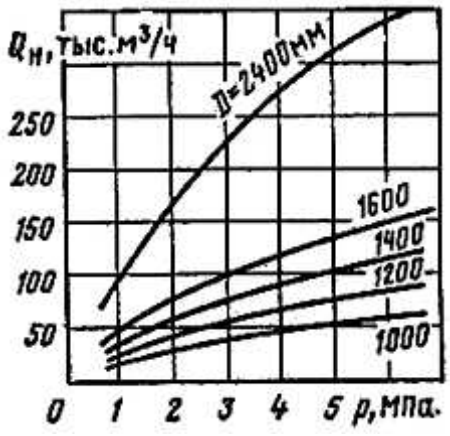


Рис. 3.3. Зависимость пропускной способности $Q_н$ масляных пылеуловителей от их диаметра D и давления газа p

Таблица 3.2

Техническая характеристика масляных пылеуловителей

Диаметр корпуса, ми	Высота, мм	Площадь поперечного сечения, м^2	Число трубок			Число отбойников	Размеры отбойной насадки, мм		Толщина стенки, мм		Масса (общая), кг	
			контактных	дренажных из осадительной секции	дренажных из отбойной секции		длина	ширина	p =5,5 МПа	p =6,4 МПа	p =5,5 МПа	p =6,4 МПа
400	5100	0,126	5	2	2	13	360	148	12	15	1 060	1 200
500	5350	0,196	6	2	2	24	430	222	15	18	1 520	1 720
600	5550	0,282	9	3	2	32	510	296	18	20	2 100	2270
1000	5950	0,785	26	5	3	75	925	333	28	32	5840	6450
1200	6300	1,132	41	7	5	85	1135	333	33	40	8500	9800
1400	6650	1,535	49	8	6	105	1340	333	40	45	12200	13420
1600	7000	2,040	27	9	6	125	1532	333	44	52	15800	18920
2400	8800	4,520	127	20	23	175	2370	333	46	-	30000	-

Циклонные сепараторы применяют на газовых промыслах для очистки газа от механических примесей, грязи и конденсата, а также на магистральных газопроводах. Циклонные сепараторы выпускают с подогревателями и без них на условные давления 6, 4, 10 и 20 МПа и с условными проходами 80, 100, 150 и 200 мм. Сепараторы с подогревателями применяют исключительно на газовых промыслах.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Для очистки транспортируемого газа от механических примесей на КС в основном используют циклонные пылеуловители ГП604.01 (типа 144 в блочном исполнении). По условиям проекта пылеуловителя массовая концентрация жидкости в составе газа не более 1 г/м^3. Средний ресурс до капитального ремонта 60 тыс. ч.

График зависимости пропускной способности центробежного пылеуловителя типа ГП604.01 от давления при различных перепадах давления на аппарате блока изображен на рис. 3.4.

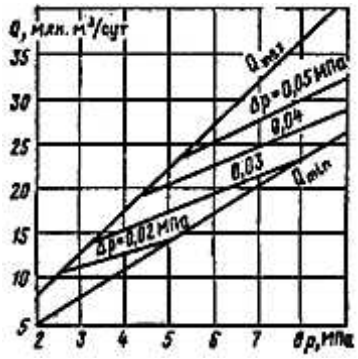


Рис. 3.4. Зависимость пропускной способности Q центробежного пылеуловителя типа ГП604.01 от давления p при различных перепадах давления Δp на аппарате блока

Техническая характеристика пылеуловителя ГП604

Пропускная способность, м^3/ч	$0{,}833 \cdot 10^6$
млн, м^3/сут	20
Давление, МПа	7,5
Температура, К	253-353
Размеры, мм:	
высота	9500
ширина	3400

3.2. ОСУШКА ГАЗА И БОРЬБА С ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕМ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

Газ, поступающий из скважин, содержит влагу в жидкой и паровой фазе. Жидкая фаза извлекается сепараторами различной конструкции. С помощью установок осушки газа на головных сооружениях снижается содержание паров воды. При низком качестве осушки газа в газопроводе конденсируется влага и образуются кристаллогидраты, в результате чего снижается его пропускная способность. Максимальное содержание влаги в газе (в г на 1 м^3 сухого газа) приближенно определяют по графику (рис. 3.5) при температуре 20 °С и давлении 0,1013 МПа.

Файл скачан с www.turbinist.ru

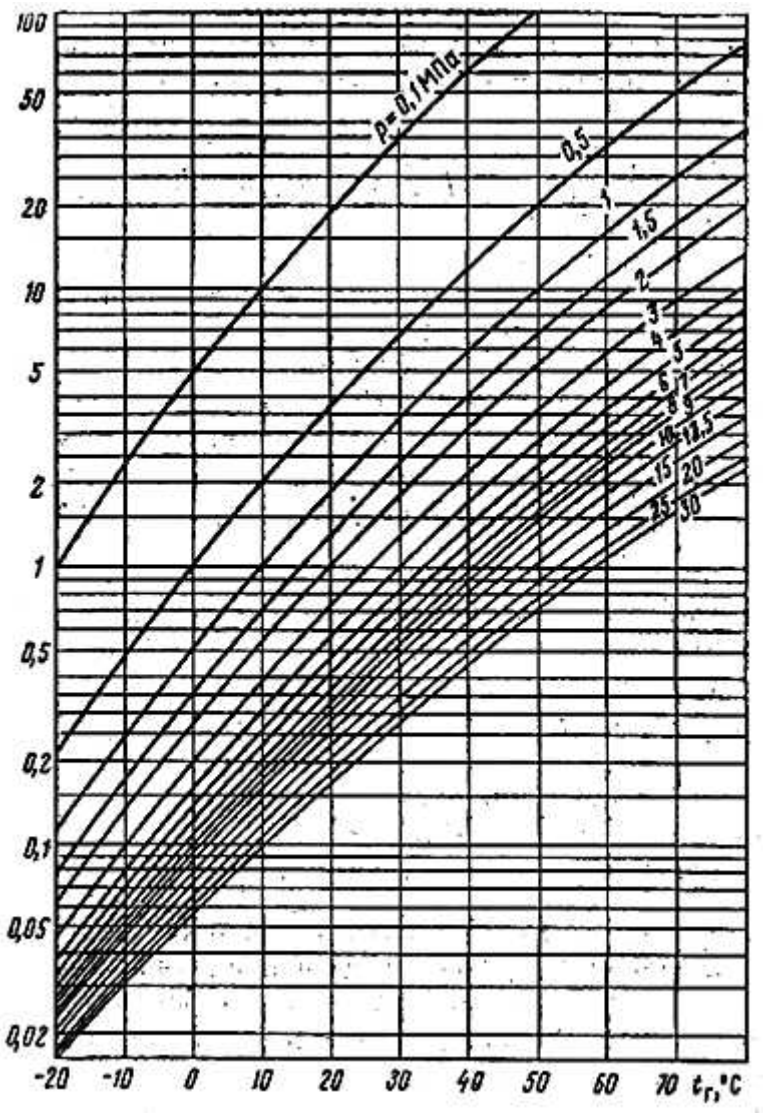


Рис 3.5. Зависимость максимального содержания влаги m в газе (при полном насыщении) от давления p и температуры $t_г$ газа

Максимальное содержание влаги (при полном насыщении) зависит от состава газа, возрастая с увеличением содержания тяжелых углеводородов, сероводорода и углекислого газа и снижаясь с повышением содержания азота.

Условия образования гидратов природных газов с различной относительной плотностью можно определить по графику (рис. 3.6), на котором слева от каждой линии находится зона с гидратами, справа - зона без гидратов. Присутствие азота, сероводорода и углекислого газа повышает температуру гидратообразования.

Файл скачан с www.turbinist.ru

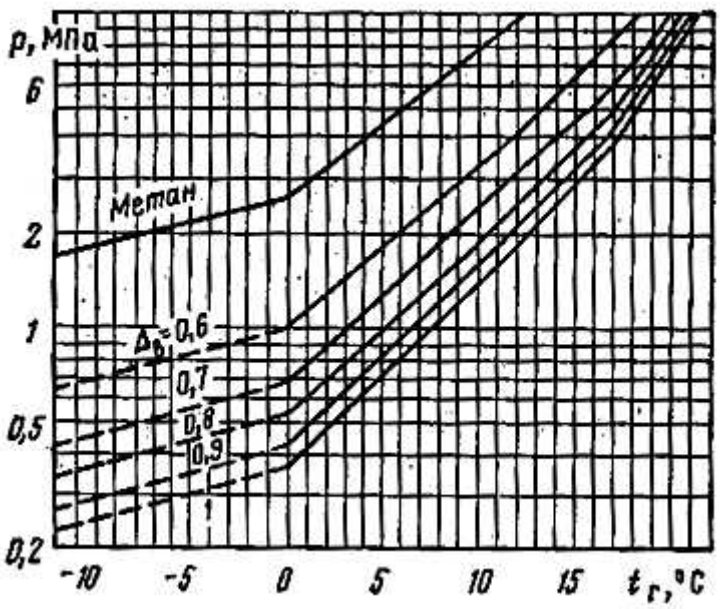


Рис. 3.6. График гидратообразования для природных газов с различной относительной плотностью $\Delta_в$

Зону возможного гидратообразования в газопроводе длиной l находят следующим образом. Определяют температуру газа $t_г$, давление $p_г$, температуру гидратообразования $t_{г.о}$ и точку росы. Полученные значения наносят на график (рис. 3.7). Участок, на котором температура газа ниже кривой гидратообразования, представляет собой зону возможного гидратообразования (на рис. 3.7 заштрихована). Точка росы определяется обычно путем охлаждения газа до температуры конденсации водяных паров. Гидраты, образующиеся в скважинах, шлейфах, газопроводах или аппаратах, разрушаются при снижении давления или увеличении температуры в системе в том месте, где произошло образование гидратов, а также при вводе метилового, этилового и пропилового спиртов, гликолей, аммиака и хлористого кальция. Аммиак применяют редко, так как он реагирует с углекислым газом, который содержится в природном газе, и образует осадок углекислого аммония, забивающего запорную арматуру.

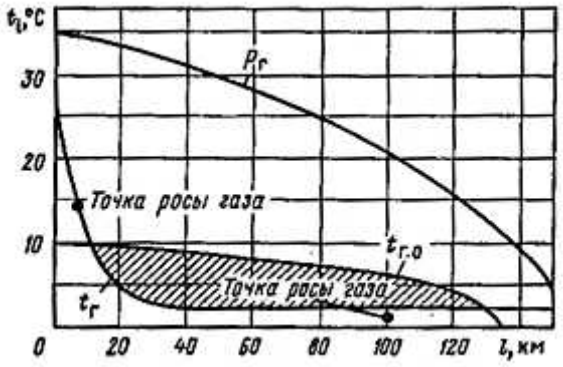


Рис. 3.7. График изменения температуры и давления и зона образования гидратов в магистральном газопроводе

Необходимое количество метанола рассчитывают следующим образом.

Файл скачан с www.turbinist.ru

1. Определяют количество воды, выделившейся из газа за сутки, $q_{\text{в}} = (m_{t\text{р}} - m_{ti})Q$, где $m_{t\text{р}}$ и m_i - содержание влаги при температуре точки росы $t_{\text{р}}$ и фактической температуре t_i газа в газопроводе (см. рис. 3.5); Q - расход газа.

2. По заданным параметрам газа, давлению и относительной плотности определяют температуру образования гидратов $t_{\text{г}}$ (см. рис. 3.6). Требуемое снижение точки росы $\Delta t_{\text{р}}$ по углеводородам рассчитывают по формуле $\Delta t_{\text{р}} = t_{\text{г}} - t_i$.

3. По графику (рис. 3.8) определяют минимальное содержание метанола в жидкости $M_{\text{ж}}$ для температуры $\Delta t_{\text{р}}$.

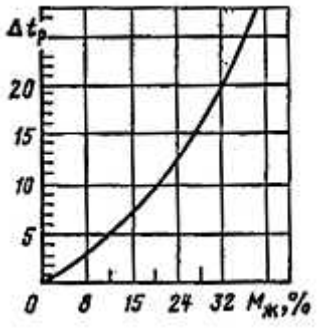


Рис. 3.8. График понижения точки замерзания жидкости в зависимости от содержания метанола

4. Находят отношение содержания метанола в парах к его содержанию в жидкости $K_{\text{м}}$ по графику рис. 3.9.

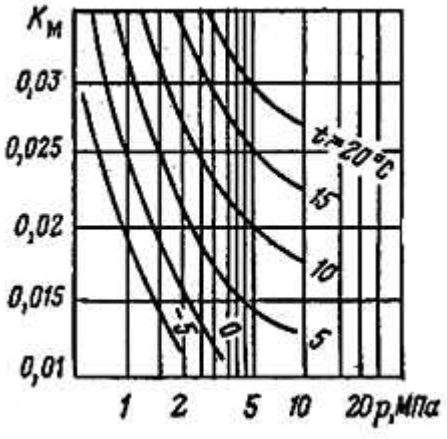


Рис. 3.9. График содержания метанола в паровой и жидкой фазах в зависимости от давления p и температуры t газа

Файл скачан с www.turbinist.ru

5. Рассчитывают концентрацию метанола в газе $K_{м.г} = K_м M_ж$.

6. Определяют количество метанола, необходимое для насыщения жидкости, $G_{м.ж} = q_в M_ж /(100 - M_ж)$.

7. Определяют количество метанола, необходимое для насыщения газа, $G_{м.г} = K_{м.г} Q$.

8. Находят общий расход метанола $G_м = G_{м.ж} + G_{м.г}$

Пример 3.1. Определить количество метанола, необходимое для предотвращения образования гидратов, при следующих условиях: пропускная способность газопровода Q = 30 млн.м^3/сут; среднее давление $p_{ср}$ = 3,8 МПа; относительная плотность по воздуху $\Delta_в$ = 0,6; температура насыщения газа парами воды $t_р$ = 305 К; минимальная температура газа в газопроводе t_i = -2 °С.

Решение

1. Количество воды, выделившейся из газа за сутки при охлаждении от 32 до -2 °С: $q_в$ =(1 - 0,15) $30 \cdot 10^6$ = 25,5· 10^6 г/сут.

2. Температура образования гидратов и необходимое снижение точки росы соответственно: $t_г$ = 12 °С и $\Delta t_р$ = 12- (-2)= 14°С.

3. Содержание метанола в жидкости (см. рис. 3.8) $M_ж$ = 26%.

4. Отношение содержания метанола в газе и воде (см. рис. 3.9) $K_м$ = 0,016%.

5. Концентрация метанола в газе $K_{м.г}$ = 26·0,016 = 0,416 г/м^3.

6. Количество метанола, необходимое для насыщения жидкости

$$G_{м.ж} = \frac{25{,}5 \cdot 10^6 \cdot 26}{100 - 26} = 8{,}95 \cdot 10^6 \text{ г/сут.}$$

7. Количество метанола, необходимое для насыщения газа,

$$G_{м.г} = 0{,}416 \cdot 30 \cdot 10^6 = 12{,}5 \cdot 10^6 \text{ г/сут.}$$

8. Общий расход метанола

$$G_м = 8{,}92 + 12{,}5 = 21{,}42 \text{ т/сут.}$$

3.3. ОСУШКА ГАЗА ТВЕРДЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ

Существуют два способа осушки природного и попутного газов: твердыми поглотителями (адсорбция) и жидкими поглотителями (абсорбция).

Файл скачан с www.turbinist.ru

Преимущества жидких поглотителей по сравнению с твердыми сорбентами заключаются в следующем: низкие перепады давления в системе очистки; возможность очистки газов, в которых содержатся вещества, отравляющие твердые сорбенты; меньшие капитальные вложения и эксплуатационные расходы. Однако степень осушки при использовании жидких поглотителей меньше, чем при использовании твердых сорбентов, а температура осушаемого газа должна быть выше 0 °С, кроме того, при наличии в осушаемом газе некоторых тяжелых углеводородов происходит вспенивание поглотителей.

Для осушки газа на промышленных установках применяют силикагель (наиболее распространенный осушитель), алюмогель, активированный боксит (флорид) и молекулярные сита.

Установки адсорбционной осушки имеют 2-4 адсорбера. Полный цикл процесса осушки твердыми поглотителями состоит из трех последовательных стадий: адсорбции продолжительностью 12-20 ч; регенерации адсорбента в течение 4-6 ч и охлаждения адсорбента в течение 1-2 ч.

Газ после сепаратора 1 (рис. 3.10), где происходит его очистка от механических примесей, капельной влаги и жидких углеводородов, поступает в адсорбер с регенерированным осушителем. Адсорбент поглощает влагу, содержащуюся в газе, после чего очищенный газ из адсорбера направляется в магистральный газопровод. Часть сырого отсепарированного газа подается в подогреватель, а затем в адсорбер с увлажненным осушителем для регенерации. Горячий газ после регенерации осушителя охлаждают и направляют в сепаратор для отделения влаги, удаленной из осушителя и выделившейся при охлаждении газа. После отделения влаги газ сливается с основным потоком сырого газа и направляется на осушку. Охлаждение адсорбента проводят холодным осушенным газом.

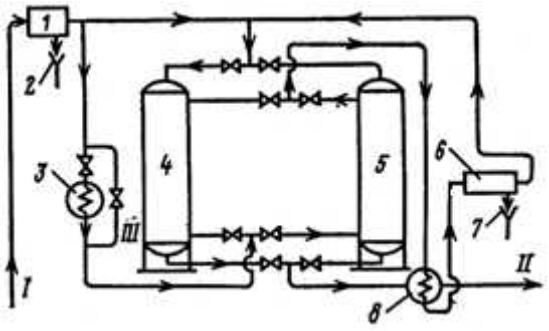


Рис. 3.10. Технологическая схема осушки газа твердыми поглотителями:

1 - сепаратор; 2 и 7 - слив воды; 3 - подогреватель; 4 и 5 - адсорберы; 6 - сепаратор; 8 - теплообменник;
I - влажный газ; II - осушенный газ; III - обводная линия

В установках с адсорбционным процессом достигается весьма низкая точка росы (-40 °С и ниже).

Количество адсорбента, необходимое для осушки газа

$$G = \frac{V_{\text{н}}(m_{\text{н}} - m_{\text{к}})\tau}{24a}, \qquad (3.1)$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

где $V_н$ - количество поступающего на осушку газа, приведенного к 20 °С и 0,1013 МПа, м^3/сут; $m_н, m_к$ - содержание влаги соответственно во влажном и осушенном газе, кг/м^3; τ - продолжительность поглощения, ч; $a = 0{,}04 \div 0{,}05$ активность адсорбента.

Пример 3.2. Определить количество адсорбента, необходимое при 12-часовом цикле работы для осушки 1000000 м^3 /сут газа, относительная плотность которого равна 0,6, температура 15 °С, абсолютное давление 6 МПа. Требуемая точка росы осушенного газа -20 °С, поглотительная способность адсорбента составляет 4 %.

Решение

По графику (см. рис. 3.5) определяют: влагосодержание влажного газа m = 0,35 г/м^3 = 0,00035 кг/м^3;

влагосодержание осушенного газа: m = 0,017 г/м^3 = 0,000017 кг/м^3.

Количество адсорбента при 12-часовом цикле

$$G = \frac{1000000(32 - 1{,}7)10^{-5} \cdot 12}{24 \cdot 0{,}04} = 3787{,}5 \text{ кг.}$$

3.4. ОСУШКА ГАЗА ЖИДКИМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ

На большинстве промыслов осушку газа выполняют жидкими поглотителями. Для абсорбционной осушки газа применяют в основном диэтиленгликоли (ДЭГ) и триэтиленгликоли (ТЭГ); при осушке впрыском как ингибитор гидратообразования используется этиленгликоль (ЭГ).

Свойства химически чистых гликолей приведены в табл. 3.3, а технические условия на товарные гликоли, выпускаемые отечественной промышленностью, - в табл. 3.4.

Таблица 3.3

Свойства химически чистых гликолей

Показатели	ЭГ	ДЭГ	ТЭГ
Относительная молекулярная масса	62,07	106,12	150,17
Плотность, г/см^3			
при 20 °С	1,11	1,118	1,126
" 15 °С	1,117	1,119	1,1274
Температура кипения (в °С) при давлении, МПа:			
0,1013	197	245	285
0,0073	123	164	198

Файл скачан с www.turbinist.ru

0,0015	91	128	162
Температура, °С:			
начала разложения	164	164,5	206
замерзания	-12,6	-8	-7,6
вспышки (в открытом тигле)	115	143,3	165,5
воспламенения на воздухе	-	350,3	173,9
Скрытая теплота парообразования при давлении 0,1013 МПа, кДж/г	799,3	628	416,2
Коэффициент объемного расширения при температуре 0-50°С	0,00062	0,00064	0,00069
Коэффициент рефракции при 20 °С	1,4318	1,4472	1,4559

Таблица 3.4

Технические условия на товарные гликоли, выпускаемые отечественной промышленностью

Гликоли	Плотность при 20°С, г/см ^{3}	Температура кипения при 0,1013 МПа, °С		Объем отгона, мл, не менее
		начало, не ниже	конец, не выше	
Этиленгликоль (ЭГ) марки:				
А	1,114-1,115	196	199	95
Б	1.110-1,115	194	200	96
В	не ниже 1,11	193	200	90
Диэтиленгликоль (ДЭГ) марки:		-		
ДП	1,116-1,1163	244	247,5	98
ДН	1,115-1,1163	241	250	96
ДГ	1,115-1,1163	240	250	96

При осушке газа жидкими поглотителями (рис. 3.11) газ, освобожденный от капельной влаги в нижней скрубберной секции абсорбера, осушается раствором гликоля. Осушенный газ проходит верхнюю скрубберную секцию, где от него отделяются капли унесенного раствора гликоля, и поступает в газопровод. Насыщенный влагой раствор гликоля подвергается регенерации в десорбере.

Файл скачан с www.turbinist.ru

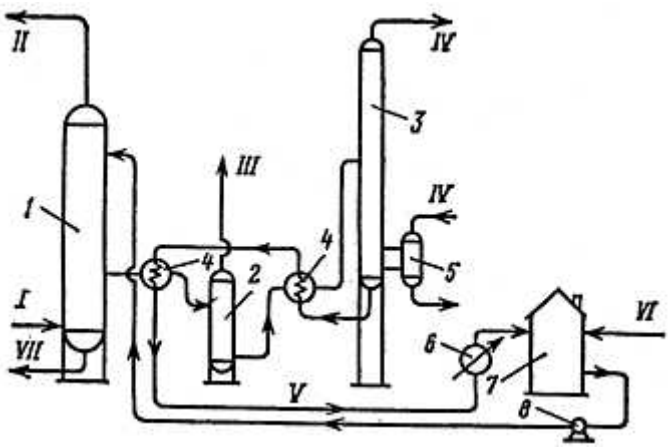


Рис. 3.11. Технологическая схема осушки газа жидкими поглотителями:

1 - абсорбер; 3 - выветриватель; 3 - отпарная колонна (десорбер); 4 - теплообменник; 5 - кипятильник;
6 - холодильник; 7 - промежуточная емкость; 8 - насос; I - сырой газ; II - осушенный газ; III - газы выветривания:
IV - водяной пар; V - регенерированный абсорбент; VI - свежий абсорбент; VII - гаэовый конденсат

В промышленности приходится иметь дело с водными растворами гликолей (рис. 3.12).

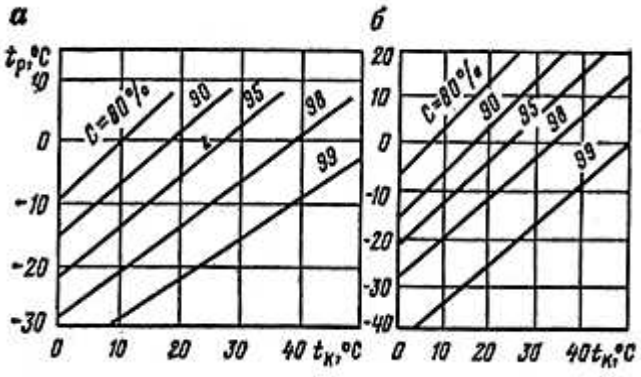


Рис. 3.12. Зависимость точки росы $t_р$ осушенного газа от температуры контакта $t_к$ и концентрации C растворов ТЭГ ($а$) и ДЭГ ($б$)

Количество свежего раствора поглотителя, необходимого для осушки газа до заданной точки росы, определяют по формуле $G = m_{x2}/(x_1 - x_2)$, где m_{x2} - количество извлекаемой из газа влаги; x_1 и x_2 - массовая доля гликоля соответственно в свежем и насыщенном растворах.

На практике разность между концентрациями свежего и насыщенного растворов принимают равной 3-4%.

Пример 3.3. Определить количество циркулирующего раствора ДЭГ, необходимого для осушки 50000 м^3/ч газа, относительная плотность которого равна 0,6; температура контакта 25 °С; газ находится в стадии насыщения водяными парами; давление 5 МПа; точка росы

Файл скачан с www.turbinist.ru

осушенного газа должна быть -5 °С, концентрация свежего ДЭГ на 3% выше концентрации насыщения раствора, содержание влаги в осушенном газе 0,1 г/м^3.

Решение

1. Определяем количество извлекаемой из газа влаги. По графику (см. рис. 3.5) содержание влаги во влажном газе равно 0,6 г/м^3, тогда

$$m_{x2} = \frac{50000(0,6-0,1)}{1000} = 25 \text{ кг/ч.}$$

2. По графику (см. рис. 3.12) концентрация раствора ДЭГ, способного снизить точку росы с 25 до -5 °С, равна 96 %.

3. Насыщенный раствор имеет концентрацию 96 - 3 =93%.

4. Количество свежего раствора ДЭГ

$$G = \frac{25 \cdot 0,93}{0,96-0,93} = 775 \text{ кг/ч.}$$

5. Плотность химически чистого ДЭГ равна 1118 кг/м^3, а плотность свежего 96 %-го водного раствора составляет 0,96·1118 + 0,04·1000 = 1113 кг/м^3.

6. Объем циркулирующего раствора 775/1113 = 0,695 м^3/ч.

7. В пересчете на 1 кг извлекаемой воды приходится свежего раствора 0,695/25 = 0,028 м^3 /кг.

На промышленных установках осушки газа расход циркулирующего раствора составляет 0,03-0,05 м^3 /кг извлекаемой воды.

Конденсат из сепараторов собирается в емкости выветривания, в которой поддерживается давление 1,5-3 МПа, а насыщенный гликоль подается на регенерацию.

Значения точек росы влажных углеводородных газов приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Значения точек росы (в °С) влажных природных углеводородных газов

Давление в газопроводе, МПа	Содержание водяных паров в газе, г/м^3																		
	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1000
0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-40	-38	-36	-33	-30,5	-28,5	-25	-23
0,5	-	-	-	-	-	-	-39	-37	-34	-31,5	-27	-24	-21,5	-19	-15,5	-13	-10,5	-7	-4
1	-	-	-	-39.5	-38	-35,5	-33	-30,5	-27,5	-25	-20	-16,5	-13,5	-12	-7,5	-4,0	-2	1,5	5

Файл скачан с www.turbinist.ru

1,5	-	-	-39	-36,5	-34,5	-31	-29	-27	-23,5	-21	-15,5	-12	-9	-6,5	-2,5	0,5	3,5	7,5	11
2	-	-40	-36,5	-34	-32	-28,5	-26,5	-24	-20,5	-18	-12,5	8,5	-5,5	-3,5	1	4,5	7	11	15
2,5	-	-38	-35	-32	-30	-27	-24	-22	-18	-15	-10	-6	-3	-0,5	4	7,5	10	14,5	18,5
3	-	-37	-33,5	-31	-28,5	-25,5	-22,5	-20,5	-16,5	-13,5	-8	-4	-1	1,5	6	9,5	12	17	21
3,5	-	-36	-32,5	-30	-27,5	-24	-21	-19	-15,5	-12	-6,5	-2,5	-1	3,5	8	11,5	14	19	23
4	-40	-35	-31,6	-29	-26,5	-23	-20	-18	-14,5	-11	-5	-1	-2,5	5	9,5	13,5	16	21	25
4,5	-39	-34	-30,5	-28	-25,5	-22	-19	-17	-13,5	-10	-4	0,5	4	6,5	11	15	18	23	27
5	-38,5	-33,5	-30	-27	-24,5	-21,5	-18	-16	-12,5	-9	-3	1,5	5	8	12,5	16,5	19,5	24,5	28,5
5,5	-38	-33	-29,5	-26,5	-24	-20	-17	-15	-11,5	-8	-2	2,5	6	9	13,5	17,5	20,5	25,5	30
6	-37,5	-32,5	-29	-26	-23,5	-19,5	-16,5	-14	-10,5	-7	1	3,5	7	10	14,5	18,5	21,5	26,5	31
6,5	-37	-32	-28,5	-25,5	-23	-19	-16	-13,5	-9,5	-6	0	4,5	8	11	15,5	19,5	22,5	27,5	32
7	-36,5	-31,5	-28	-25	-22,5	-18,5	-15,5	-13	-9	-5,5	0,5	5	9	12	16,5	20,5	23,5	28,5	33
7,5	-36	-31	-27,5	-24,5	-22	-18	-15	-12,5	-8,5	-5	1	5,5	9,5	12,5	17,5	21,5	24,5	29,5	34

3.5. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СЕПАРАЦИЯ

Осушка и извлечение конденсата из газа, добываемого на газоконденсатных месторождениях, совмещаются в одном процессе - низкотемпературной сепарации (НТС). При охлаждении газа за счет дросселирования и применения установок искусственного холода или турбодетандеров одновременно выделяются углеводород и влага. Для борьбы с образующимися гидратами в поток сырого газа перед теплообменниками "газ-газ" впрыскивают метанол или гликоли. Точка росы по влаге определяется температурой и концентрацией гликоля на выходе теплообменника.

Схема линии промысловой установки НТС производительностью 4 млн. $м^3$/сут с использованием установки искусственного холода изображена на рис. 3.13. Газ при температуре 40 °С и давлении 5,5 МПа поступает в трубное пространство теплообменников, в которых охлаждается обратным потоком газа до температуры -5°С. В результате изобарического охлаждения прямого потока тяжелые углеводороды отделяют от газа в сепараторах С-1 и С-2. В сепараторе первой ступени С-1 отделяются конденсат и влага, выделившиеся из газа от пласта до сепаратора. В сепараторе второй ступени С-2 отделяется смесь конденсат-гликоль. Далее газ поступает в трубное пространство испарителя, в котором в результате теплообмена между кипящим хладагентом и газом последний охлаждается до температуры -12 °С. Выделившаяся жидкость отводится из сепаратора С-3 на разделение, а очищенный и осушенный холодный газ, после теплообменников нагретый до температуры 30-35 °С, с давлением 5,3-5,4 МПа поступает в магистральный газопровод.

Файл скачан с www.turbinist.ru

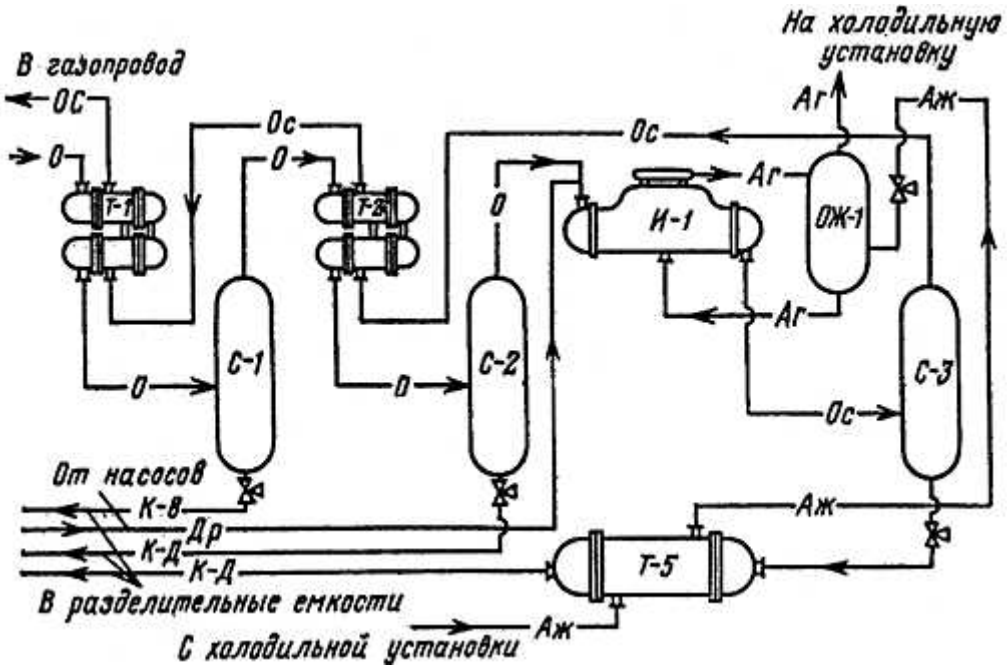


Рис. 3.13. Технологическая схема установки НТС с искусственным холодом:

С-1, С-2, С-3 - сепараторы; Т-1, Т-2 - теплообменники; И-1 - испаритель; ОЖ-1 - отделитель жидкости;
Т-5 - теплообменник утилизации холода конденсата; О - газ сырой; Ос - газ осушенный;
К-В - смесь конденсат - вода; К-Д - смесь конденсат - ДЭГ; Др - ДЭГ регенерированный;
Аг - аммиак газообразный; Аж - аммиак жидкий

Для вырабатывания холода на установках НТС применяют пропановый АТП-5-5/3 и аммиачный АТКА-545-4000-1 турбокомпрессоры.

Парообразный аммиак (рис. 3.14) из испарителей установки НТС с давлением 0,18 МПа и температурой от -23 до -18°С направляется на холодильную установку и в сухой отделитель жидкости ОЖ-2, после чего компримируется в компрессоре. Сжатый парообразный аммиак смешивается с потоком парообразного аммиака из промежуточной емкости ПСГ-250, после чего еще раз компримируется и подается в воздушный конденсатор. Сконденсировавшийся аммиак направляется в линейные ресиверы и далее через испарители на установку НТС.

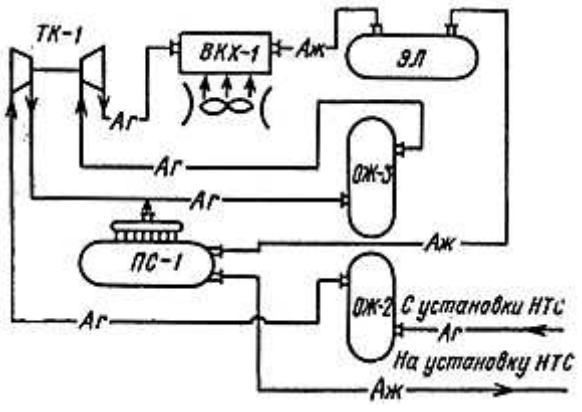


Рис. 3.14. Технологическая схема холодильной установки:

Файл скачан с www.turbinist.ru

ТК-1 - аммиачный турбокомпрессорный агрегат; ПС-1 - промежуточный сосуд; ОЖ-2, ОЖ-3 - отделители жидкости; ВКХ-1 - воздушный холодильник-конденсатор; ЭЛ - ресивер линейный; Аг - аммиак газообразный; Аж - аммиак жидкий

ГЛАВА 4
ТРАНСПОРТ ГАЗА

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

Пропускная способность газопровода в сутки (в млн. м ^{3} /сут)

$$q = Q_{\text{г}} / 365 k_{\text{год}},$$

где $Q_{\text{г}}$ - годовая пропускная способность газопровода, млрд. м ^{3} /год; $k_{\text{год}}$ - среднегодовой коэффициент использования пропускной способности газопровода, $k_{\text{год}} = k_{\text{нх}} k_{\text{н.д}} k_{\text{р.н}}$; $k_{\text{нх}}$ - коэффициент народнохозяйственного резерва; $k_{\text{н.д}}$ - относительный показатель надежности газопровода; $k_{\text{р.н}}$ - коэффициент регулирования неравномерности газопотребления.

Пропускная способность участка газопровода (при 0,1013 МПа и 20 °С)

$$q = 105{,}087 \cdot 10{,}2 D^{2{,}5} \sqrt{\frac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2}{\lambda \Delta_{\text{в}} T_{\text{ср}} z_{\text{ср}} l}},$$

где D - внутренний диаметр газопровода, мм; $p_{\text{н}}$ и $p_{\text{к}}$ - давление газа соответственно в начале и конце участка газопровода, МПа; λ - коэффициент гидравлического сопротивления; $\Delta_{\text{в}}$ - относительная плотность газа по воздуху; $T_{\text{ср}}$ - средняя температура по длине газопровода, К; $z_{\text{ср}}$ - средний по длине газопровода коэффициент сжимаемости газа; l - длина участка газопровода.

Пропускную способность участка газопровода при разности отметок его более 200 м рассчитывают по формуле

$$q = 105{,}087 \cdot 10{,}2 \cdot 10^{-6} D^{2{,}5} \times \\ \times \sqrt{\frac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2 (1 + a h_{\text{к}})}{\lambda \Delta T_{\text{ср}} z_{\text{ср}} l \left[1 + \frac{a}{2l} \sum (h_i + h_{i+1}) l_i \right]}},$$

где $a = \Delta / (14{,}64 T_{\text{ср}} z_{\text{ср}})$; $h_{\text{к}}$ - отметка конечной точки расчетного участка относительно начальной, м; h_i - метка i-й точки трассы относительно начальной, м; l_i - длина i-го участка, км.

Среднее давление газа на участке газопровода

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$p_{\text{ср}} = \frac{2}{3}\left(p_{\text{н}} + \frac{p_{\text{к}}^2}{p_{\text{н}} + p_{\text{к}}} \right).$$

Давление газа в произвольной точке участка газопровода

$$p_x = \sqrt{p_{\text{н}}^2 - (p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2)x/l},$$

где x - расстояние от начала до произвольной точки участка газопровода.

Число Рейнольдса определяют по формуле

$$\text{Re} = \frac{v\rho d}{\mu} = \frac{vD}{\nu} = \frac{4q}{\pi \nu D} = 1{,}81 \cdot 10^3 \frac{q\Delta_{\text{в}}}{D\mu},$$

где v - линейная скорость потока газа, м/с; ρ - плотность газа, кг/м^3; D - диаметр газопровода, мм; μ - динамическая вязкость газа, Па·с; ν - кинематическая вязкость газа, м^2/с; $\Delta_{\text{в}}$ - относительная плотность газа по воздуху; q - пропускная способность газопровода, млн. м^3/сут.

Теоретический коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda = 1{,}05\lambda_{\text{тр}}$, где 1,05 - поправочный коэффициент, учитывающий сопротивления линейных кранов и многониточных переходов; $\lambda_{\text{тр}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления трубы при течении газа:

для ламинарного режима (Re < $2 \cdot 10^3$) $\lambda_{\text{тр}} = 64/\text{Re}$;

для зоны гладкостенного режима (Re = $2 \div 4 \cdot 10^3$)

$$\lambda_{\text{тр}} = 0{,}067(158/\text{Re})^{0{,}2} = 0{,}1844/\text{Re}^{0{,}2};$$

для зоны смешанного или переходного режима (Re > $4 \cdot 10^3$)

$$\lambda_{\text{тр}} = 0{,}067(158/\text{Re} + 2k_{\text{э}}/D)^{0{,}2} = 0{,}067(158/\text{Re} + \varepsilon)$$

$k_{\text{э}}$ - эквивалентная шероховатость, т. е. средняя высота линейных размеров выступов (для новых газопроводов $k_{\text{э}} = 0{,}03$ мм); ε - относительная шероховатость, 1/мм; $\varepsilon = 2k_{\text{э}}/D$;

для зоны квадратичного режима

$$\lambda_{\text{тр}} = 0{,}067(2k_{\text{э}}/D)^{0{,}2} = 0{,}067\varepsilon^{0{,}2}.$$

При эквивалентной шероховатости, равной 0,03 мм

$$\lambda_{\text{тр}} = 0{,}03817/D^{0{,}2}.$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

Коэффициент гидравлического сопротивления можно определить по номограмме, изображенной на рис. 4.1.

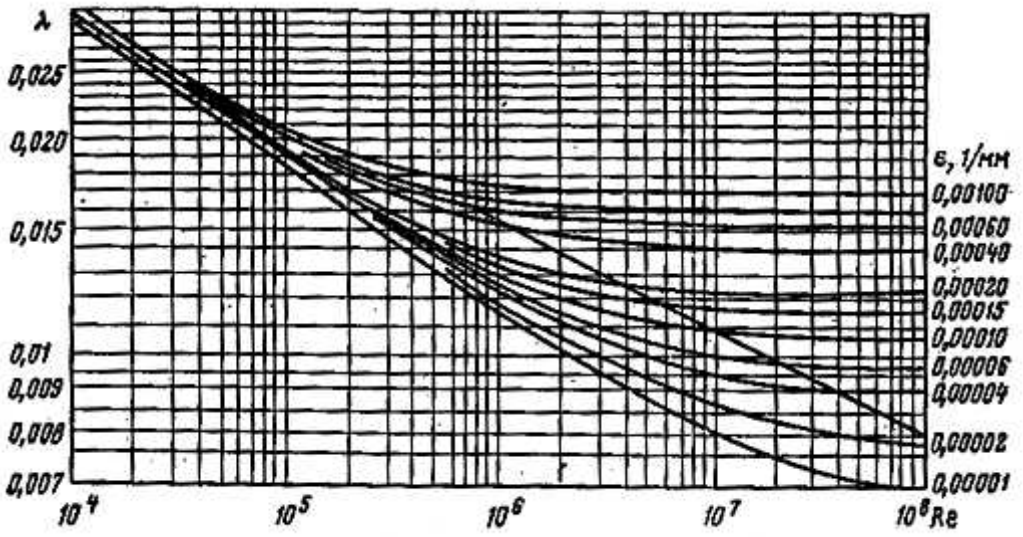


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от числа Рейнольдса Re и шероховатости ε

Пропускная способность газопровода для граничных условий течения газа (между переходным и квадратичным режимами) при $k_э$ = 0,03 мм определяется по номограмме на рис. 4.2 или по формуле $q = 0{,}4\, D^{2{,}5}\, \mu / \Delta_в$ при $\mathrm{Re} = 11\,(D / 2k_э)^{1{,}5}$.

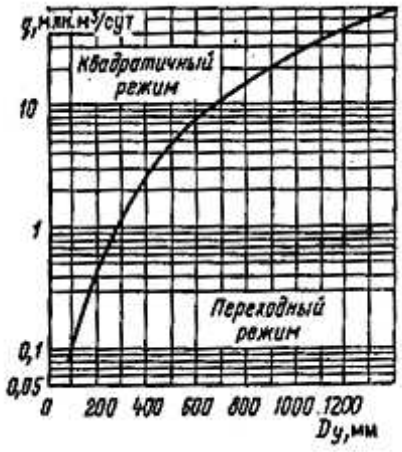


Рис. 4.2. График для определения режима течения газа

Для эквивалентной шероховатости $k_э$ = 0,03 мм коэффициент гидравлического сопротивления для труб различного диаметра можно найти по номограмме, изображенной на рис. 4.3.

Файл скачан с www.turbinist.ru

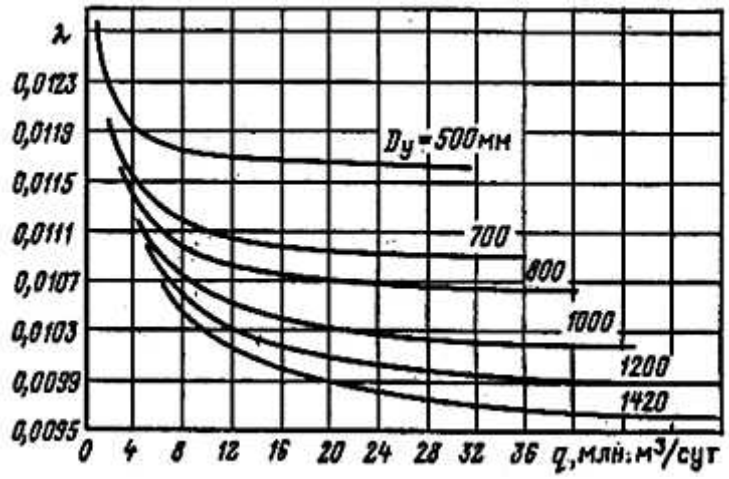


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от расхода газа q и диаметра газопровода $D_{\text{у}}$

При квадратичном режиме течения теоретический коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_{\text{теор}}$ определяют по номограмме на рис, 4.4.

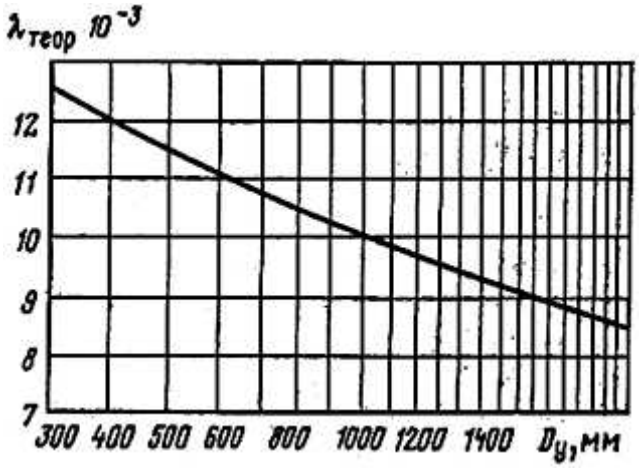


Рис. 4.4. Зависимость $\lambda_{\text{теор}}$ от диаметра газопровода при квадратичном режиме

Пропускная способность газопровода в общем виде

$$q = \alpha\varphi E 1{,}64 \cdot 10^{-3} D^{2{,}6} \sqrt{\frac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2}{\Delta_{\text{в}} T_{\text{ср}} z_{\text{ср}} l}}, \qquad (4.1)$$

где α - поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного, определяется графически (рис. 4.5) в зависимости от пропускной способности q и диаметра газопровода D (для квадратичного режима $\alpha = 1$); φ - коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец (при расстоянии между кольцами $l_{\text{к}} = 0$, $\varphi = 1$; при

Файл скачан с www.turbinist.ru

$l_к$ = 12 м, φ = 0,975; при $l_к$ = 6 м, φ = 0,95); E - коэффициент эффективности, учитывающий состояние внутренней полости газопровода.

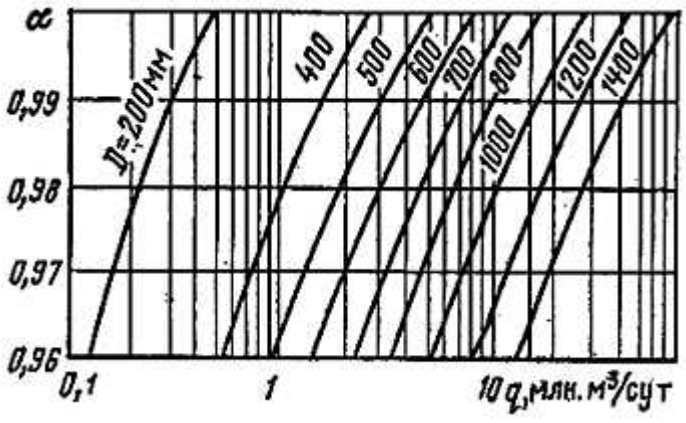


Рис. 4.5. График определения коэффициента α

Для упрощения расчетов по формуле (4.1) можно пользоваться табл. 4.1 (при $\Delta_в$ = 0,6, $z_{ср}$ = 0,92 и $T_{ср}$ = 288 К), в которой $D_{нар}$ - наружный диаметр газопровода, мм; δ - толщина стенки газопровода, мм;

$$k_т = 1{,}64 \cdot 10^{-6} \cdot D^{2,6} \sqrt{\frac{1}{\Delta_в z_{ср} T_{ср}}}.$$

Таблица 4.1

Вспомогательные данные для гидравлического расчета газопровода

$D_{нар} \times \delta$	$D^{2,6} \cdot 10^6$	$1{,}64 10^6 \times D^{2,6}$	$k_т$
108 x3	0,1659	0,2720	0,0216
x4	0,1575	0,2584	0,0205
x5	0,1495	0,2452	0,0194
x6	0,1417	0,2324	0,0184
114 x3	0,1925	0,3157	0,0250
x4	0,1834	0,3007	0,0238
x5	0,1745	0,2862	0,0227
x6	0,1659	0,2720	0,0216
159 x2	0,4924	0,8076	0,0640
x3	0,4760	0,7807	0,0619
x4	0,4601	0,7546	0,0595

Файл скачан с www.turbinist.ru

x5	0,4444	0,7287	0,0578
x6	0,4291	0,7037	0,0558
168 x3	0,5524	0,9050	0,0718
x4	0,5348	0,8770	0,0666
x5	0,5175	0,8488	0,0673
x6	0,5007	0,8212	0,0651
x7	0,4842	0,7941	0,0630
219 x3	1,1251	1,8452	0,1463
x4	1,0981	1,8009	0,1428
x5	1,0712	1,7568	0,1393
x6	1,0448	1,7135	0,1359
x7	1,0185	1,6703	0,1325
x8	0,9930	1,6286	0,1292
273 x3	2,0248	3,3207	0,2633
x4	1,9654	3,2561	0,2582
x5	1,9469	3,1929	0,2532
x6	1,9085	3,1299	0,2482
x7	1,8706	3,0678	0,2432
x8	1,8336	3,0071	0,2385
325 x3	3,2161	5,2744	0,4182
x4	3,1645	5,1898	0,4116
x5	3,1120	5,1037	0,4047
x6	3,0613	5,0205	0,3982
x7	3,0107	4,9375	0,3916
x8	2,9602	4,8547	0,3850
325 x9	2,9107	4,7736	0,3786
x10	2,8617	4,6932	0,3722
377 x4	4,6951	7,7000	0,6106
x5	4,6302	7,5935	0,6022

Файл скачан с www.turbinist.ru

x6	4,5657	7,4878	0,5938
x7	4,5012	7,3820	0,5854
x8	4,4347	7,2729	0,5768
x9	4,3725	7,1709	0,5687
x10	4,3090	7,0668	0,5604
426 x4	6,4941	10,650	0,8445
x5	6,4138	10,519	0,8342
x6	6,3335	10,387	0,8236
x7	6,2546	10,258	0,8134
x8	6,1759	10,129	0,8032
x9	6,0982	10,001	0,7930
x10	6,0198	9,872	0,7829
x11	5,9438	9,7478	0,7730
478 x4	8,8084	14,446	1,1456
x5	8,7109	14,286	1,1329
x6	8,6138	14,127	1,1202
x7	8,5165	13,967	1,1075
x8	8,4242	13,816	1,0956
x9	8,3287	13,659	1,0832
x10	8,2384	13,511	1,0714
508 x6,35	10,170	16,670	1,3220
529 x4	11,516	18,886	1,4976
x5	11,400	18,696	1,4825
x6	11,284	18,506	1,4675
x7	11,173	18,324	1,4531
x8	11,060	18,138	1,4383
x9	10,947	17,953	1,4237
x10	10,835	17,769	1,4091
x11	10,727	17,592	1,3950
630 x4	18,255	29,938	2,3741

Файл скачан с www.turbinist.ru

x5	18,100	29,684	2,3540
630 x6	17,952	29,441	2,3347
x7	17,795	29,184	2,3143
x8	17,651	28,948	2,2955
x9	17,497	28,695	2,2756
x10	17,355	28,465	2,2571
x11	17,203	28,213	2,2373
720 x6	25,555	41,910	3,3235
x7	25,366	41,600	3,2989
x8	25,197	41,323	3,2770
x9	25,002	41,003	3,2515
x10	24,814	40,695	3,2272
x11	24,635	40,401	3,2038
820 x6	36,034	59,096	4,6864
x7	35,802	58,715	4,6562
x8	35,564	58,325	4,6253
x9	35,354	57,981	4,5979
x10	35,123	57,602	4,5679
x11	34,884	57,210	4,5368
x12	34,874	56,865	4,5095
920 x6	48,809	80,047	6,3479
x7	48,528	79,586	6,3113
x8	48,270	79,163	6,2777
x9	47,975	78,679	6,2394
x10	47,696	78,221	6,2030
x11	47,411	77,754	6,1660
x12	47,152	77,329	6,1323
x13	46,859	76,849	6,0943
1020 x7	63,711	104,49	8,2861
x8	63,380	103,94	8,2424

Файл скачан с www.turbinist.ru

x9	63,057	103,41	8,1996
1020 x10	62,721	102,86	8,1569
x11	62,345	102,33	8,1142
x12	62,092	101,83	8,0744
x13	61,742	101,26	8,0297
x14	61,429	100,74	7,9880
1120 x7	81,524	133,70	10,6023
x8	81,115	133,03	10,5486
x9	81,742	132,42	10,5009
x10	80,367	131,80	10,4513
x11	79,992	131,19	10,4036
x12	79,593	130,53	10,3509
x13	79,231	129,94	10,3042
x14	78,863	129,34	10,2565
1220 x10	100,77	165,26	13,1053
x11	100,33	164,54	13,0477
x12	99,91	163,85	12,9930
x13	99,47	163,13	12,9364
x14	99,03	162,41	12,8788
1420 x9	150,98	247,61	19,6356
x10	150,45	246,74	19,5661
x11	149,90	245,84	19,4955
x12	149,32	244,89	19,4200
x13	148,78	244,00	19,3494
x14	148,22	243,08	19,2759
x15	147,67	242,18	19,2054
x16	147,09	241,23	19,1298

Среднее давление газа $p_{\text{ср}}$ в зависимости от начального $p_{\text{н}}$ и конечного давления $p_{\text{к}}$, а также соответствующее ему значение коэффициента сжимаемости газа $z_{\text{ср}}$ для диапазона

Файл скачан с www.turbinist.ru

температур: $T_1 = 298 \div 323$ К, $T_2 = 283 \div 298$ К и $T_3 = 323 \div 348$ К, можно определить по рис. 4.6.

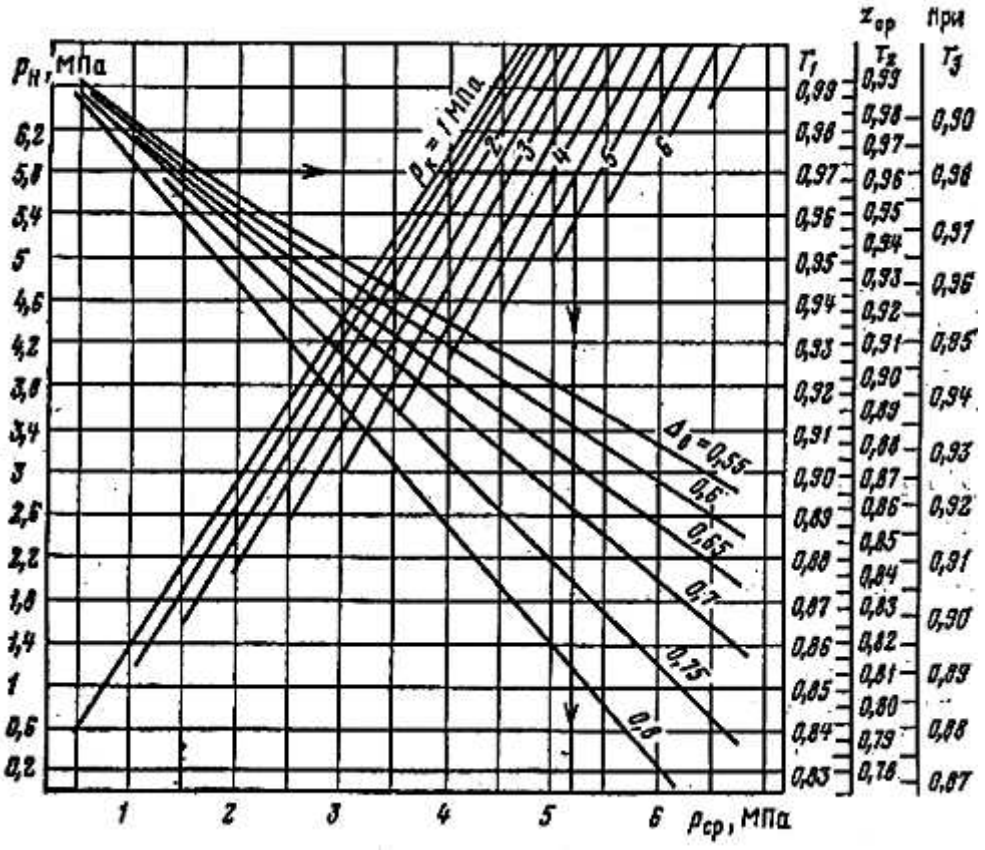


Рис. 4.6. График определения среднего давления и коэффициента сжимаемости газа

4.2. УПРОЩЕННЫЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МНОГОНИТОЧНОГО ГАЗОПРОВОДА

При гидравлических расчетах сложный газопровод с переменным диаметром заменяют эквивалентным газопроводом с постоянным диаметром, который имеет такую же пропускную способность при тех же начальном и конечном давлениях.

Взаимосвязь параметров эквивалентного и конкретного газопроводов определяется выражением

$$\frac{D_э^{2,5}}{l_э} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k}(l_i / D_i^{2,5})},$$

где $D_э$ - диаметр эквивалентного газопровода; $l_э$ - длина эквивалентного газопровода; k - число i-х участков с различными диаметрами; l_i и D_i - соответственно длина и диаметр этих участков.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Пропускная способность газопровода с учетом параметров эквивалентного газопровода и физических свойств газа

$$q = \varphi E 3{,}24 \cdot 1{,}64 \cdot 10^{-5} \sqrt{D_э^{2,5} / l_э} \sqrt{(p_н^2 - p_к^2)/(\Delta_в T_{ср} z_{ср})} .$$

Коэффициент расхода (отношение пропускной способности одного газопровода к пропускной способности другого при одинаковых параметрах и свойствах транспортируемого газа и квадратичном законе течения)

$$n = q_1 / q_2 - D_1^{2,6} / D_2^{2,6} .$$

При относительном расходе, равном единице, по газопроводу диаметром 700 м получаем

$$q = n_{(100)} 0{,}326 \cdot 10^{-5} \cdot 100^{2,5} \sqrt{\frac{p_н^2 - p_к^2}{\Delta_в T_{ср} z_{ср} \lambda l}} = 42{,}2 n_{(100)} \sqrt{\frac{p_н^2 - p_к^2}{\Delta_в T_{ср} z_{ср} \lambda l}} .$$

Коэффициент расхода многониточного газопровода, состоящего из s ниток одинаковой длины, $n = \sum_{i=1}^{s} n_i$.

Коэффициент расхода однониточного газопровода, состоящего из m участков разного диаметра

$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} l_i}{\sum_{i=1}^{m} (l_i / n_i)}},$$

где l_i и n_i - соответственно длина и коэффициент расхода i-го участка.

Коэффициент расхода для сложного многониточного газопровода

$$n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=m} l_i}{\sum_{i=1}^{i=m} \left(l_i \Big/ \sum_{i=1}^{i=s} n_i^2 \right)}},$$

где m и s - числа соответственно участков и ниток на каждом участке.

Значения коэффициентов расхода n газопроводов различного диаметра по отношению к газопроводам с условным диаметром $D_у$, равным 700, 1000, 1200 мм, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Файл скачан с www.turbinist.ru

Коэффициенты расхода для газопроводов разного диаметра по отношению к газопроводам с условным диаметром D_y, равным 700, 1000 и 1200 мм

$D_{\text{у}}$, мм	n (100)	n (1000)	n (1200)	$D_{\text{у}}$, мм	n (700)	n (1000)	n (1200)
50	0,0010	-	-	600	0,6698	0,2649	0,1649
100	0,0064	-	-	700	1,0000	0,3956	0,2462
150	0,0182	-	-	800	1,4151	0,5598	0,3484
200	0,0385	0,0152	-	900	1,9410	0,7678	0,4779
250	0,0688	0,0271	-	1000	2,5278	1,0000	0,6224
300	0,1105	0,0437	0,0272	1200	4,0608	1,6064	1,0000
350	0,1649	0,0652	0,0406	1400	6,0629	2,3984	1,4930
400	0,2334	0,0923	0,0574	1600	8,5794	3,3940	2,1127
500	0,4169	0,1649	0,0904				

Пропускная способность одной нитки многониточного газопровода

$$q_i = \frac{q_{\text{общ}}}{\sum_{i=1}^{s} n_i} n_i ,$$

где q_i и $q_{\text{общ}}$ - пропускная способность соответственно i-й нитки газопровода и суммарная; n_i - коэффициент расхода i- й нитки.

Для упрощения расчета сложного многониточного газопровода его можно заменить эквивалентным однониточным (с условным диаметром $D_{\text{у}}$, равным 700, 1000 и 1200 мм), имеющим ту же пропускную способность при тех же начальном и конечном давлениях.

Эквивалентная длина сложного многониточного газопровода

$$l_{\text{э}} = \sum_{i=1}^{m} \frac{l_i}{\left(\sum_{i=1}^{s} D_i^{2,6} \right)^2} D_{\text{э}}^{5,2} ,$$

где m - число участков; l_i - длина участка; s - число ниток на участке; D_i - диаметр i-й нитки на участке длиной l_i, $D_{\text{э}}$ - диаметр эквивалентного газопровода.

Пример 4.1. Рассчитать эквивалентную длину газопровода (рис. 4.7) в общем виде.

Файл скачан с www.turbinist.ru

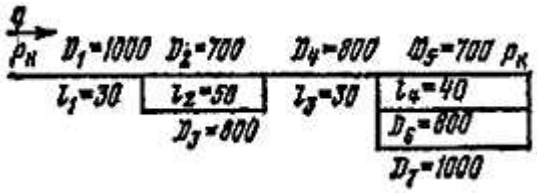


Рис. 4.7. К расчету примера 4.1

Решение

$$l_э = \left[\frac{l_1}{D^{5,2}} + \frac{l_2}{\left(D_2^{2,6} + D_3^{2,6}\right)^2} + \frac{l_3}{D_4^{5,2}} + \frac{l_4}{\left(D_5^{2,6} + D_6^{2,6} + D_7^{2,6}\right)^2} \right] D_э^{5,2}$$

или

$$l_э = \frac{l_1}{n_1^2} + \frac{l_2}{(n_2 + n_3)^2} + \frac{l_3}{n_4^2} + \frac{l_4}{(n_5 + n_6 + n_7)^2}.$$

Пример 4.2. Рассчитать эквивалентную длину того же газопровода, приняв $D_э = 700$ мм.

Решение

$$l_э = \frac{30}{(2{,}5278)^2} + \frac{50}{(1+1{,}4151)^2} + \frac{30}{(1{,}4151)^2} + \frac{40}{(1+1{,}4151+2{,}5278)^2} = 29{,}8856 \text{ км}.$$

Для системы параллельно работающих газопроводов

$$l_э^{0,5} = \sum_{i=1}^{s} \frac{l_1^{0,5}}{D_i^{2,6}} D_э^{2,6}.$$

Если $l_1 = l_2 = l_2 = ... = l_i = l$, то $l_э = l / \left(\sum_{i=1}^{s} n_i \right)^2$. Если $l_1 = l_2 = l_3 = ... = l_s = l$ и $D_1 = D_2 = D_3 = ... = D_s = D$, то $l_э = l / s$.

Для однониточного газопровода, имеющего участки с разными диаметрами:

$$l_э = \sum_{i=1}^{s} l_i (D_э / D_i)^{5,2} = \sum_{i=1}^{s} (l_i / n_i^2),$$

где $l_э$ и $D_э$ - соответственно длина и диаметр эквивалентного газопровода; s - число участков с разными диаметрами; n_i, l_i и D_i - соответственно коэффициент расхода, длина и диаметр i-го участка.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Практические формулы для гидравлического расчета магистральных газопроводов

Для определения пропускной способности рекомендуется упрощенная формула

$$q = 10{,}14k\sqrt{(p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2)/l_{\text{э}}}\,,$$

где

$$k = 103{,}15 \cdot 10^{-6}\sqrt{D^5/(\Delta_{\text{в}} z_{\text{ср}} T_{\text{ср}} \lambda)}\,, \qquad (4.2)$$

$p_{\text{н}}$ и $p_{\text{к}}$ - начальное и конечное давления на участке;

$l_{\text{э}}$ - эквивалентная длина участка газопровода.

Если на расчетном участке сброс или приток, то

$$p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2 = \frac{q^2 l_{\text{э1}} + (q \mp \Delta q)^2 l_{\text{э2}}}{k^2},$$

где $l_{\text{э1}}$ и $l_{\text{э2}}$ - эквивалентные длины участков до сброса или притока и после него; Δq - сброс (-) или приток (+).

Гидравлическая эффективность газопровода

$$E = q_{\text{факт}}/q_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{теор}}}{\lambda_{\text{факт}}}} \approx k_{\text{факт}}/k_{\text{теор}},$$

где $q_{\text{факт}}$ и $q_{\text{теор}}$ - соответственно фактическая и теоретическая пропускные способности газопровода; $\lambda_{\text{теор}}$ и $\lambda_{\text{факт}}$ - соответственно теоретический и фактический коэффициенты гидравлического сопротивления; $k_{\text{факт}}$ и $k_{\text{теор}}$ - соответственно фактический и теоретический коэффициенты, характеризующие гидравлическое состояние газопровода и определяемые по формуле (4.2).

Фактический коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{10640 d^5 \cdot 10^{-12}}{\Delta_{\text{в}} z T k_{\text{факт}}^2},$$

где

$$k_{\text{факт}}^2 = q^2 l_{\text{э}}/(p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2).$$

В табл. 4.3 приведены значения пропускной способности однониточных газопроводов разного диаметра при эффективности E = 100 %, $p_{\text{к}}$ = 3,8 МПа, $p_{\text{н}}$ = 5,6 МПа, l = 125 км, $T_{\text{ср}}$ = 288 К, z = 0,9 и $\Delta_{\text{в}}$ = 0,6.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Таблица 4.3

Пропускная способность однониточных газопроводов разного диаметра

$D_{\text{у}}$, мм	q, млн.м^3/сут
200	0,78
300	1,32
350	1,96
400	2,78
500	4,97
600	7,95
700	12
800	16,8
1000	30
1200	48,2

В табл. 4.4 приведены значения коэффициентов $k_{\text{теор}}$ и $k^2_{\text{теор}}$ для газопроводов разных диаметров при различной эффективности ($\Delta_{\text{в}} = 0{,}6$, $T = 288$ К и $z = 0{,}9$), а в табл. 4.5 значения коэффициентов гидравлического сопротивления.

Таблица 4.4

Значения коэффициентов $k_{\text{теор}}$ (в числителе) и $k^*_{\text{теор}}$ (в знаменателе) для газопроводов разных диаметров и эффективности E ($\Delta_{\text{в}}$ = 0,6; T = 288 К и z = 0,9)

$D_{\text{у}}$,	E										
мм	0,694	0,725	0,76	0,792	0,82	0,846	0,88	0,905	0,93	0,955	0,1
150	0,0016 -------- 0,041	0,00182 -------- 0,0427	0,0020 -------- 0,0445	0,0021 -------- 0,0465	0,0232 -------- 0,0480	0,0025 -------- 0,0498	0,0026 -------- 0,0514	0,0028 -------- 0,0530	0,0030 -------- 0,0546	0,0031 -------- 0,0560	0,0034 -------- 0,0586
200	0,0074 -------- 0,086	0,0081 -------- 0,090	0,0089 -------- 0,0945	0,0096 -------- 0,098	0,0104 -------- 0,102	0,0110 -------- 0,105	0,0118 -------- 0,109	0,0126 -------- 0,112	0,0133 -------- 0,115	0,0140 -------- 0,118	0,0154 -------- 0,124
250	0,0237 -------- 0,154	0,026 -------- 0,162	0,0284 -------- 0,169	0,0307 -------- 0,175	0,0330 -------- 0,182	0,0355 -------- 0,189	0,0378 -------- 0,195	0,0402 -------- 0,201	0,0425 -------- 0,207	0,0449 -------- 0,212	0,0492 -------- 0,222

Файл скачан с www.turbinist.ru

300	0,061 -------- 0,247	0,067 -------- 0,259	0,073 -------- 0,271	0,079 -------- 0,282	0,085 -------- 0,292	0,092 -------- 0,304	0,098 -------- 0,314	0,104 -------- 0,323	0,110 -------- 0,332	0,116 -------- 0,341	0,127 -------- 0, 57
350	0,136 -------- 0,369	0,150 -------- 0,389	0,164 -------- 0,405	0,177 -------- 0,422	0,191 -------- 0,438	0,204 -------- 0,452	0,218 -------- 0,467	0,232 -------- 0,482	0,245 -------- 0,496	0,259 -------- 0,509	0,284 -------- 0,534
400	0,273 -------- 0,523	0,30 -------- 0,549	0,328 -------- 0,573	0,355 -------- 0,597	0,382 -------- 0,618	0,410 -------- 0,642	0,436 -------- 0,661	0,474 -------- 0,690	0,491 -------- 0,702	0,519 -------- 0,720	0,568 -------- 0,754
500	0,863 -------- 0,934	0,995 ------ 0,979	1,04 -------- 1,02	1,13 -------- 1,065	1,22 -------- 1,105	1,30 -------- 1,14	1,39 -------- 1,18	1,48 -------- 1,22	1,56 -------- 1,25	1,66 -------- 1,29	1,82 -------- 1,35
600	2,23 -------- 1,495	2,46 -------- 1,57	2,68 -------- 1,64	2,90 -------- 1,71	3,13 -------- 1,76	3,35 -------- 1,83	3,56 -------- 1,89	3,8 -------- 1,95	4,02 -------- 2,01	4,29 -------- 2,06	4,64 -------- 2,16
700	5 -------- 2,24	5,5 -------- 2,35	6 -------- 2,46	6,5 -------- 2,56	7 -------- 2,65	7,5 -------- 2,74	8 ------- 2,84	8,5 -------- 2,92	9 -------- 3	0,5 -------- 3,09	10,4 -------- 3,23
800	10 -------- 3,17	11 -------- 3,32	12 -------- 3,47	13 -------- 3,62	14 -------- 3,75	15 -------- 3,88	16 -------- 4	17 ----- 4,14	18 -------- 4,25	19 -------- 4,37	20,8 -------- 4,57
1000	32 -------- 5,75	35,2 -------- 5,94	38,4 -------- 6,2	41,6 -------- 6,46	44,8 -------- 6,7	48 -------- 6,94	51,2 -------- 7,16	54,3 -------- 7,39	57,6 -------- 7,6	60,8 -------- 7,8	66,4 -------- 8,15
1200	82 -------- 9,7	90,2 -------- 9,52	98,5 -------- 9,95	106,5 -------- 10,35	115 -------- 10,75	123 -------- 11,1	131 -------- 11,45	140 -------- 11,85	148,8 -------- 12,2	156 -------- 12,5	171 -------- 13,1
1400	183,5 -------- 13,55	202 -------- 14,25	220 -------- 14,85	238 -------- 15,5	257 -------- 16,05	275 -------- 16,6	293 -------- 17,55	312 -------- 17,7	330 -------- 18,2	348 -------- 18,7	382 -------- 19,6

Таблица 4.5

Коэффициент гидравлического сопротивления λ для газопроводов разных диаметров D, эффективности E и коэффициента k_{700}^2

D, мм	E ; k_{700}^2									
	E = 0,694; $k^2 = 5$	0,725; 6	0,76; 6,5	0,792; 7	0,846; 7,5	0,88; 8	0,905; 8,5	0,93; 9	0,955; 9,5	1; 10,4
150	0,0314	0,0262	0,0242	0,0224	0,021	0,0196	0,0185	0,0174	0,0165	0,01515
200	0,0294	0,0246	0,0227	0,0210	0,0198	0,0185	0,0173	0,0164	0,0156	0,01419
250	0,0283	0,0236	0,0218	0,0203	0,0189	0,0177	0,0167	0,0158	0,0149	0,0136

Файл скачан с www.turbinist.ru

300	0,0272	0,0228	0,0210	0,0195	0,0180	0,0169	0,0160	0,0151	0,0143	0,01308
350	0,0265	0,0220	0,0204	0,0189	0,0176	0,0165	0,0155	0,0147	0,0139	0,0127
400	0,0256	0,0213	0,0197	0,0183	0,0171	0,0160	0,0148	0,0142	0,0135	0,01235
500	0,0246	0,0205	0,0188	0,0174	0,0164	0,0153	0,0143	0,0136	0,0129	0,0117
600	0,024	0,0199	0,01835	0,0170	0,0159	0,0149	0,0140	0,0133	0,0126	0,0115
700	0,023	0,0192	0,0177	0,01645	0,01535	0,0144	0,0132	0,0128	0,0121	0,01107
800	0,0224	0,0187	0,0172	0,0160	0,0149	0,0140	0,0132	0,0124	0,0118	0,01075
1000	0,0214	0,0178	0,0164	0,0153	0,0142	0,01335	0,0126	0,0119	0,0112	0,0103
1200	0,0210	0,0176	0,0162	0,0150	0,0141	0,0132	0,0124	0,0117	0,0111	0,0101
1400	0,0201	0,0167	0,0154	0,0143	0,0134	0,0126	0,0118	0,0111	0,0105	0,0096
1600	0,0195	0,0162	0,0150	0,0139	0,0130	0,0122	0,0115	0,0108	0,0103	0,0093

Прокладка лупинга

В случае сохранения режима течения газа и гидравлической эффективности при прокладке лупинга справедлив ряд соотношений.

Пропускная способность после прокладки лупинга

$$q_1 = q / \sqrt{1 - \frac{l_л}{l}\left\{1 - \frac{1}{\left[1 - (D_л / D)^{2,6}\right]^2}\right\}},$$

где q - пропускная способность соответственно до прокладки лупинга, млн.м^3/сут; l и $l_л$ - длина соответственно перегона газопровода и лупинга, км; D и $D_л$ - диаметр соответственно основной нитки и лупинга, мм.

Таблица 4.6 приемлема для оценки пропускной способности абсолютно чистых труб. ЦДУЕСГ СССР и ВНИИГаз провели совместную работу по исследованию гидравлической эффективности линейной части вновь вводимого газопровода. При строительстве новой магистрали часть построенных участков подключается в виде лупингов к действующей системе для увеличения ее пропускной способности. Из-за снижения скорости течения газа по основной трубе в районе подключения участка, низкой скорости в самом лупинге происходит незначительное ухудшение гидравлической эффективности в начальный период эксплуатации. Требуется определенное время для самоочистки от воды и строительного мусора подключаемого газопровода. После ввода всех КС за счет увеличения скорости движения газа коэффициент гидравлического сопротивления линейной части постепенно улучшается.

Таблица 4.6

Пропускная способность магистрального газопровода при поэтапном сооружении КС

Файл скачан с www.turbinist.ru

Процент сооружаемых КС	Этапы сооружения КС	Относительная пропускная способность газопровода от номинальной, %
100	Сооружаются все КС	100
	Сооружается каждая КС:	
50	2-я	71
33	3-я	58
25	4-я	50
20	5-я	45

Значения коэффициента гидравлической эффективности при развитии газопровода

Строительство лупингов длиной 25-50 % от длины участка	0,8
Труба полностью введена	0,8
Строительство лупингов длиной 51-75% от длины участка	0,77
Ввод КС через 5-6 станций	0,82
Ввод через 4 станции	0,85
через 3 станции	0,87
через 2 станции	0,88
Все КС введены	0,9
Через 3 мес после последнего ввода	0,93
Через 6 мес после последнего ввода	0,95

При планировании пропускной способности магистральных газопроводов следует учитывать величину гидравлической эффективности линейных участков как в период ввода лупингов, так и при вводе КС.

Пропускную способность магистральных газопроводов при начальных давлениях 5,6 МПа, 7,5 МПа для эффективности 90 % и 100 % можно определить по табл. 4.7 и 4.8.

Таблица 4.7

Пропускная способность (в млн. м^3/сут) для магистральных газопроводов разных длин l и диаметров D_y ($p_н$ =5,6 МПа, $p_к$ = 3,8 МПа $T_{ср}$ = 288 К, Δ = 0,6)

Файл скачан с www.turbinist.ru

l, км	$D_{у}$, мм								
	500	700	800	1000	1200	1400	1000; 1200	1200 1400	1200 1200 1400
При E =100%									
100	5,5	13,3	18,9	33,7	54,1	80,9	87,9	135	189,1
110	5,3	12,7	18	32,2	52,8	77,1	83,9	128,8	180,4
120	5,1	12,2	17,2	30,8	49,4	73,8	80,2	123,2	172,6
140	4,7	11,2	16	28,5	45,8	68,4	74,3	116,7	162,4
160	4,4	10,5	15	26,8	42,9	64	69,7	106,9	149,8
180	4,1	9,9	14,1	25,1	40,3	60,2	65,4	100,5	140,9
200	3,9	9,4	13,3	23,9	38,2	57,2	62,1	95,4	133,6
220	3,8	9	12,8	22,8	36,5	54,5	59,3	91,1	127,6
240	3,6	8,5	12,2	21,8	35	52,2	56,8	87,2	122,2
260	3,4	8,2	11,8	20,9	33,6	50,1	54,4	83,7	117,2
280	3,3	8	11,3	20,2	32,3	48,4	52,5	80,7	113
300	3,2	7,7	10,9	19,4	31,2	46,7	50,3	77,9	109,1
325	3,1	7,4	10,4	18,7	30	44,9	48,7	74,5	104,9
350	3	7,2	10,1	18,1	29	43,5	47	72,1	101
375	2,9	6,9	9,8	17,5	28	41,8	45,4	69,8	97,8
400	2,8	6,7	9,4	16,9	27,1	40,4	44	67,6	94,7
450	2,6	6,3	8,9	16	25,7	38,3	41,6	63,7	89,2
500	2,4	6	8,4	15,1	24,2	36,2	39,3	60,4	84,6
550	2,1	5,7	8,1	14,5	23,1	34,6	37,6	57,8	80,9
600	2,2	5,4	7,8	13,8	22,1	33	35,9	55,1	77,2
650	2,1	5,2	7,5	13,3	21	31,8	34,6	53,1	74
700	2,1	5	7,1	12,8	20,4	30,5	33,2	51	71,4
750	2,1	4,8	6,9	12,4	19,8	29,5	32,1	49,3	68,1
800	2	4,7	6,7	11,9	19,1	28,5	31	47,7	66,8
900	1,9	4,4	6,3	11,2	18	27	29,2	45	63
1000	1,8	4,2	6,0	10,7	17,1	25,6	27,8	42,8	60

Файл скачан с www.turbinist.ru

1100	1,7	4	5,7	10,2	16,3	24,3	26,5	40,7	57
1300	1,5	3,8	5,3	9,4	15,1	22,6	24,6	37,8	52,9
1500	1,4	3,4	4,9	8,7	14	20,9	22,7	34,9	48,9
1750	1,3	3,2	4,5	8,2	13	19,5	21,2	32,5	45,5
2000	1,2	3	4,2	7,6	12,1	18,1	19,7	30,2	42,3
При $E = 90\%$									
100	5	12	17	30,4	48,7	72,8	79,1	121,9	170,2
110	4,8	11,4	16,2	29	46,5	69,4	75,5	115,9	162,4
120	4,6	11	15,5	27,7	44,5	66,4	72,2	110,9	155,4
140	4,2	10,1	14,4	25,7	41,2	61,6	66,9	105	146,2
160	4	9,5	13,5	24,1	38,6	57,6	62,7	96,2	134,8
180	3,7	8,9	12,7	22,6	36,3	54,2	58,9	90,5	126,8
200	3,5	8,5	12	21,5	34,4	51,5	55,9	85,9	120,3
220	3,4	8,1	11,5	20,5	32,9	49,1	53,4	82	114,9
240	3,2	7,7	11	19,6	31,5	47	51,1	78,5	110
260	3,1	7,4	10,6	18,8	30,2	45,1	49	75,3	105,5
280	3	7,2	10,2	18,2	29,1	43,5	47,3	72,6	101,7
300	2,9	6,9	9,8	17,5	28,1	42	45,6	70,1	98,2
325	2,8	6,7	9,4	16,8	27	40,4	43,8	67,4	94,4
350	2,7	6,4	9,1	16,2	26	38,9	42,2	64,9	90,9
375	2,6	6,2	8,8	15,7	25,2	37,6	40,9	62,8	88
400	2,5	6	8,5	15,2	24,4	36,4	36,9	60,8	85,2
450	2,4	5,7	8	14,3	23	34,3	37,3	57,3	80,3
500	2,2	5,4	7,6	13,6	21,8	32,6	35,4	54,4	76,2
550	2,1	5,1	6,2	13	20,8	31	33,8	51,8	72,6
600	2	4,9	7	12,4	19,9	29,7	32,3	49,6	69,5
650	2	4,7	6,7	11,9	19,1	28,6	31	47,7	66,8
700	1,9	4,5	6,4	11,5	18,4	27,5	29,9	45,9	64,3
750	1,8	4,4	6,2	11,1	17,8	26,6	28,9	44,4	62,2
800	1,8	4,2	6	10,7	17,2	25,7	27,9	42,9	60,1

Файл скачан с www.turbinist.ru

900	1,7	4	5,7	10,1	16,2	24,3	26,3	40,5	56,7
1000	1,6	3,8	5,4	9,6	15,4	23	25	38,4	53,8
1100	1,5	3,6	5.1	9,2	14,7	21,9	23,9	36,6	51,3
1300	1,4	3,3	4,7	8,4	13,5	20,2	21,9	33,7	47,2
1500	1,3	3,1	4,4	7,8	12,6	18,8	20,4	31,4	44
1750	1,2	2,9	4,1	7,3	11,6	17,4	18,9	29	40,6
2000	1,1	2,7	3,8	6.8	10,9	16,3	17,7	27,2	33,1

Таблица 4.8

Пропускная способность (в млн. м^3/сут) для магистральных газопроводов разных длин l и диаметра $D_У$ ($p_н$ = 7,5 МПа, $p_к$ = 5,6 МПа, $T_{ср}$ = 288 К, Δ = 0,6)

l, км	$D_У$, мм					
	1200	1400	1200; 1400	1200	1400	1200; 1400
	При Е = 90 %			При Е = 100 %		
100	62,3	92,9	155,2	68,3	102	170,3
110	59,4	88,6	148	65,6	98	163,6
120	56,8	84,8	141,6	62,9	93,8	156,7
140	52,6	78,6	131,2	58,1	86,8	144,9
160	49,2	73,5	122,6	54,4	81,2	135,6
180	46,4	69,3	115,7	51,3	76,6	127,9
200	44	65,7	109,7	48,7	72,7	121,4
220	42	62,7	104,7	46,4	69,3	115,7
240	40,2	60	100,2	44,4	66,3	110,7
260	38,6	57,6	96,2	42,7	63,7	106,4
280	37,2	55,5	92,7	41,1	61,4	102,4
300	36	53,7	89,7	39,7	59,3	99
325	34,5	51,6	86,1	38,2	57	95,2
350	33,3	49,7	83	36,8	54,9	91,7

Файл скачан с www.turbinist.ru

375	32,2	48	80,2	35,6	53,1	88,7
400	31,1	46,5	77,6	34,4	51,4	85,8
450	29,4	43,8	73,2	32,5	48,4	80,9
500	27,8	41,6	69,4	30,8	46	76,8
550	26,6	39,6	66,2	29,4	43,8	73,2
600	25,4	37,9	63,3	28,1	42	70,1
650	24,4	36,5	60,9	27	40,3	67,3
700	23,5	35,1	58,6	26	38,8	64,8
750	22,7	33,9	56,6	25,1	37,5	62,6
800	22	32,9	54,9	24,3	36,3	60,6
900	20	31	51,8	22,9	34,3	57,2
1000	19,7	29,4	49,1	21,8	32,2	54

Увеличение пропускной способности при прокладке лупинга

$$Дq = q\left\{1 - \frac{1}{\sqrt{1 - l_л \Big/ l\left\{\frac{1}{\left[1-(d_л/d)^{2,6}\right]^2}\right\}}}\right\}.$$

Необходимая длина лупинга, прокладываемого для доведения пропускной способности газопровода до величины q_1

$$l_л = \frac{l\left[1-(q/q_1)^2\right]}{1-\frac{1}{\left[1+(d_л/d)^{2,6}\right]^2}}.$$

Протяженность лупинга, необходимого для повышения давления газа в конце расчетного участка газопровода с $p_{к1}$ до $p_{к2}$:

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$l_{\text{к}} = \frac{l\left[1 - \dfrac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}2}^2}{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}1}^2}\right]}{1 - \left[\dfrac{d_{\text{э}}^{2,6}}{d_{\text{э}}^{2,6} + d_{\text{л}}^{2,6}}\right]^2}.$$

При равенстве диаметров лупинга и основного газопровода ($d_{\text{л}} = d$) длина лупинга для повышения давления в конце участка

$$l_{\text{л}} = \frac{4}{3} l\left[1 - \frac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}2}^2}{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}1}^2}\right],$$

а для повышения пропускной способности

$$l_{\text{л}} = \frac{4}{3} l\left[1 - \left(\frac{q}{q_1}\right)^2\right].$$

Диаметр лупинга для доведения пропускной способности до величины q_1

$$d_{\text{л}} = \left\{\left[\frac{l_{\text{л}} / l}{(q/q_1)^2 + (l_{\text{л}}/l - 1)}\right]^{0,5} - 1\right\}^{0,741}.$$

При равенстве диаметров лупинга и основной нитки пропускная способность

$$q_1 = q\frac{2}{\sqrt{4 - 3l_{\text{л}}/l}},$$

а увеличение пропускной способности

$$\Delta q = q\left(1 - 2/\sqrt{4 - 3l_{\text{л}}/l}\right).$$

4.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МНОГОНИТОЧНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ НОМОГРАММ

Для облегчения построения и пользования номограммами, изображенными на рис. 4.8-4.13, принято: $\Delta_{\text{в}} = 0,6$; $z_{\text{ср}} = 0,9$, $T_{\text{ср}} = 288$. Режим течения газа принят квадратичным или близким к нему, что характерно для большинства эксплуатирующихся газопроводов. С помощью номограмм можно проводить графическое определение следующих величин: эффективности работы газопровода (см. рис. 4.8, 4.9 и 4.10), пропускной способности многониточного магистрального газопровода (см. рис. 4.11 и 4.12), пропускной способности эквивалентного газопровода и конечного давления (см. рис. 4.13), эквивалентной длины многониточного газопровода (рис. 4.14), соотношения между фактической и приведенной пропускными способностями участка газопровода (рис. 4.15); увеличения или уменьшения пропускной способности газопровода при вводе или отключении лупинга (см. рис. 4.8-4.14); изменения

Файл скачан с www.turbinist.ru

конечного давления при вводе или отключении лупинга или изменение количества транспортируемого газа на участке (см. рис. 4.8-4.14) и т. д. Эффективность работы газопровода определяют по номограммам на рис. 4.8 и 4.9 при начальном давлении $p_{\text{н}}$ до 5,6 МПа и по номограмме на рис. 4.10 при начальном давлении до 7,5 МПа.

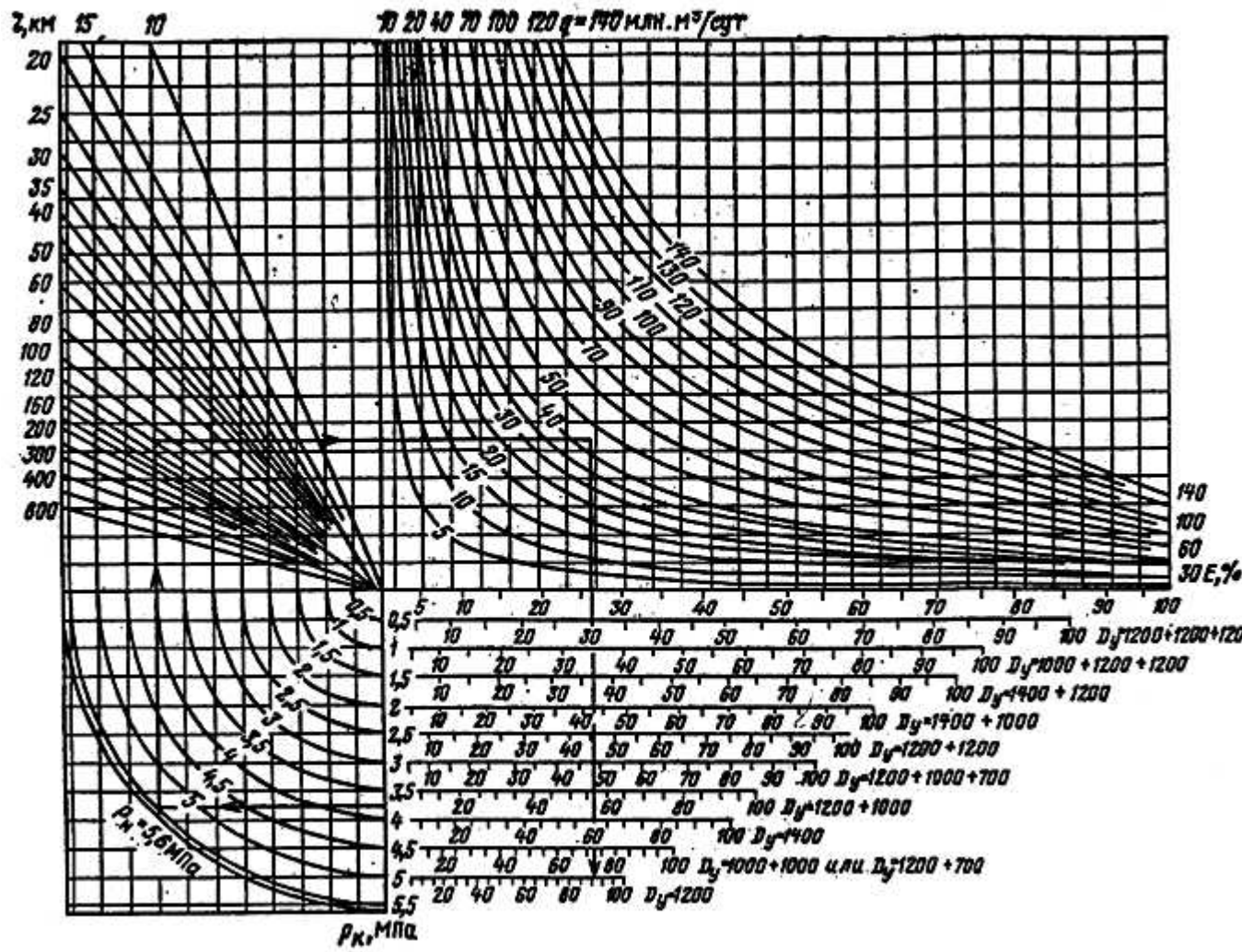


Рис. 4.8. Номограмма для определения эффективности работы газопровода (при $p_{\text{н}} \leq$ 5,6 МПа):

$$p_{\text{к}} \rightarrow p_{\text{н}} \rightarrow l \rightarrow q \rightarrow \sum_{i=1}^{n} D_{\text{у}} \rightarrow E$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

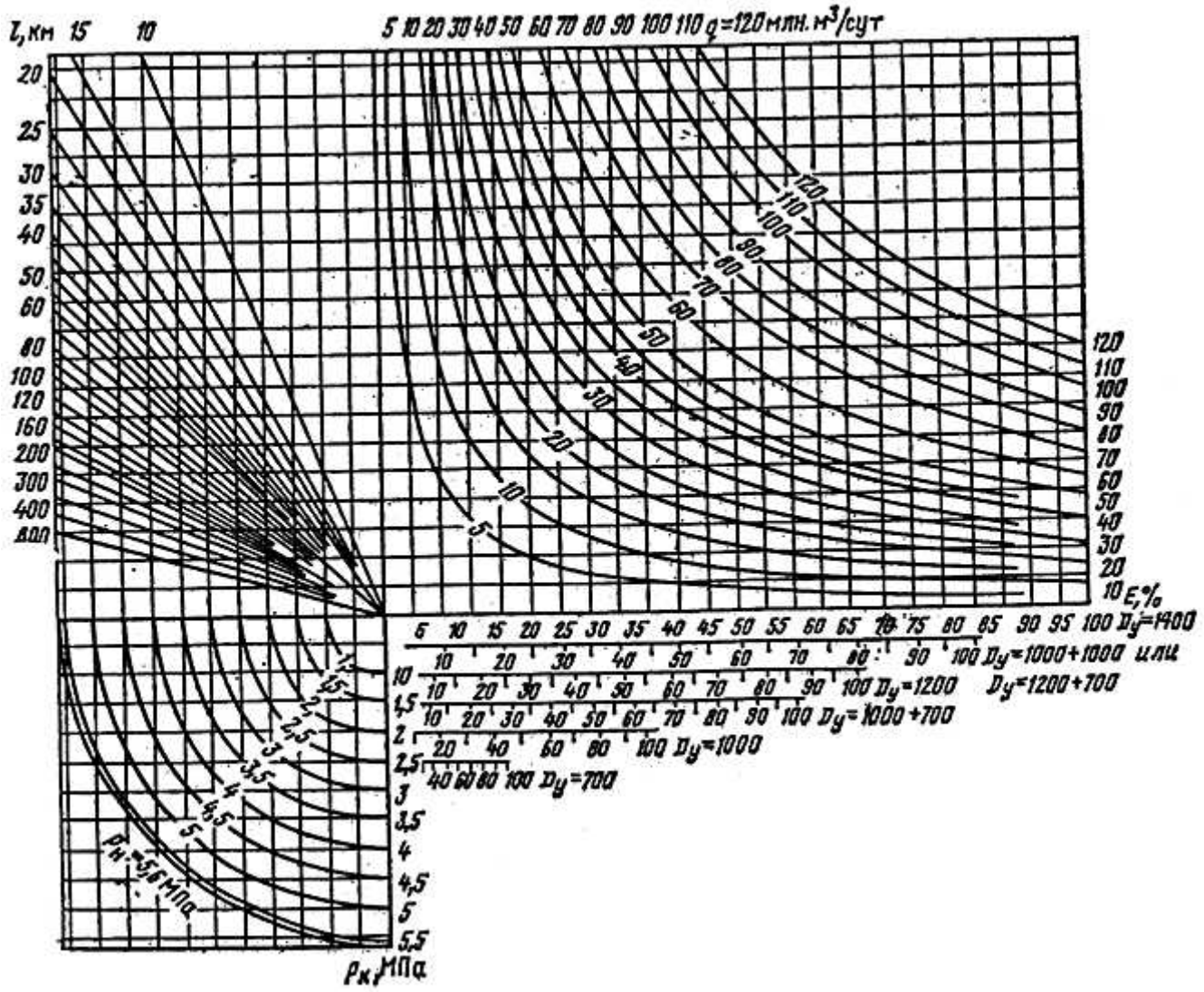


Рис. 4.9. Номограмма для определения эффективности работы газопровода ($p_{\text{н}} \leq$ 5,6 МПа):

$$p_{\text{к}} \rightarrow p_{\text{н}} \rightarrow l \rightarrow q \rightarrow \sum_{i=1}^{n} D_{\text{у}} \rightarrow E$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

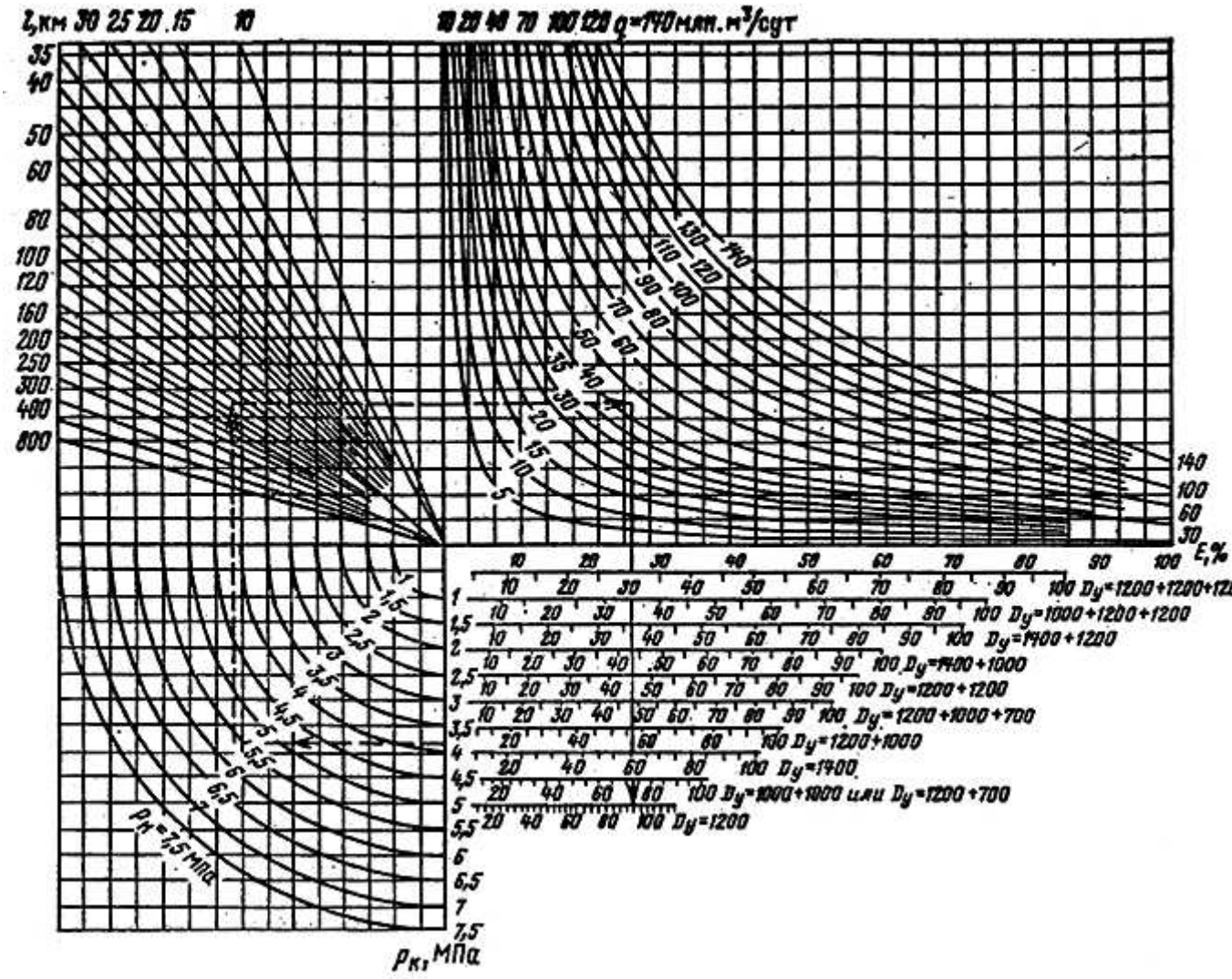


Рис. 4.10. Номограмма для определения эффективности работы газопровода ($p_{\text{н}} \leq 7{,}5$ МПа):

$$p_{\text{к}} \rightarrow p_{\text{н}} \rightarrow l \rightarrow q \rightarrow \sum_{i=1}^{n} D_{\text{у}} \rightarrow E$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

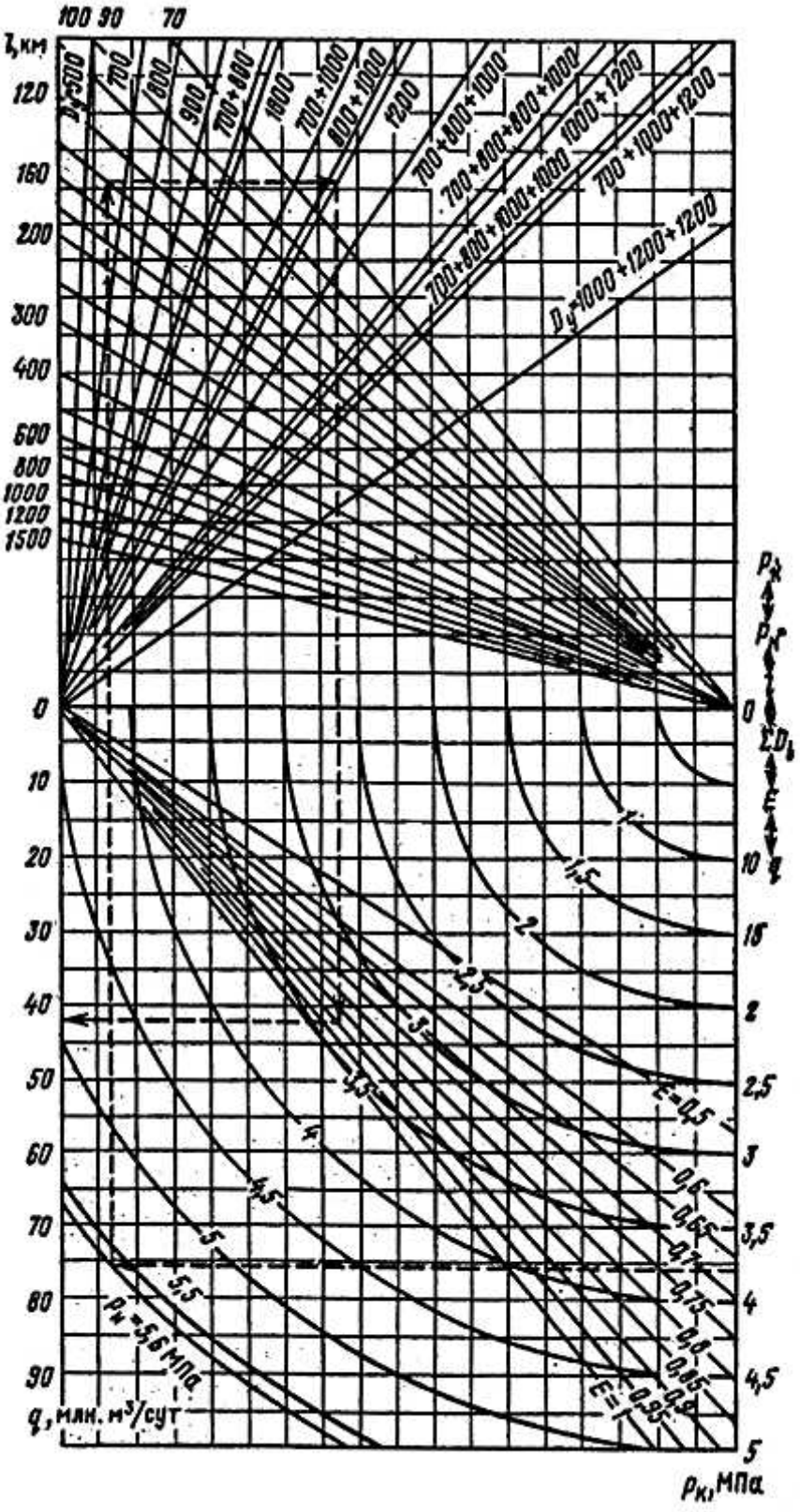


Рис. 4.11. Номограмма для определения пропускной способности участка газопровода и конечного давления газа ($D_{\text{у}} \leq$ 1200 мм, $l \leq$ 1500 км)

Файл скачан с www.turbinist.ru

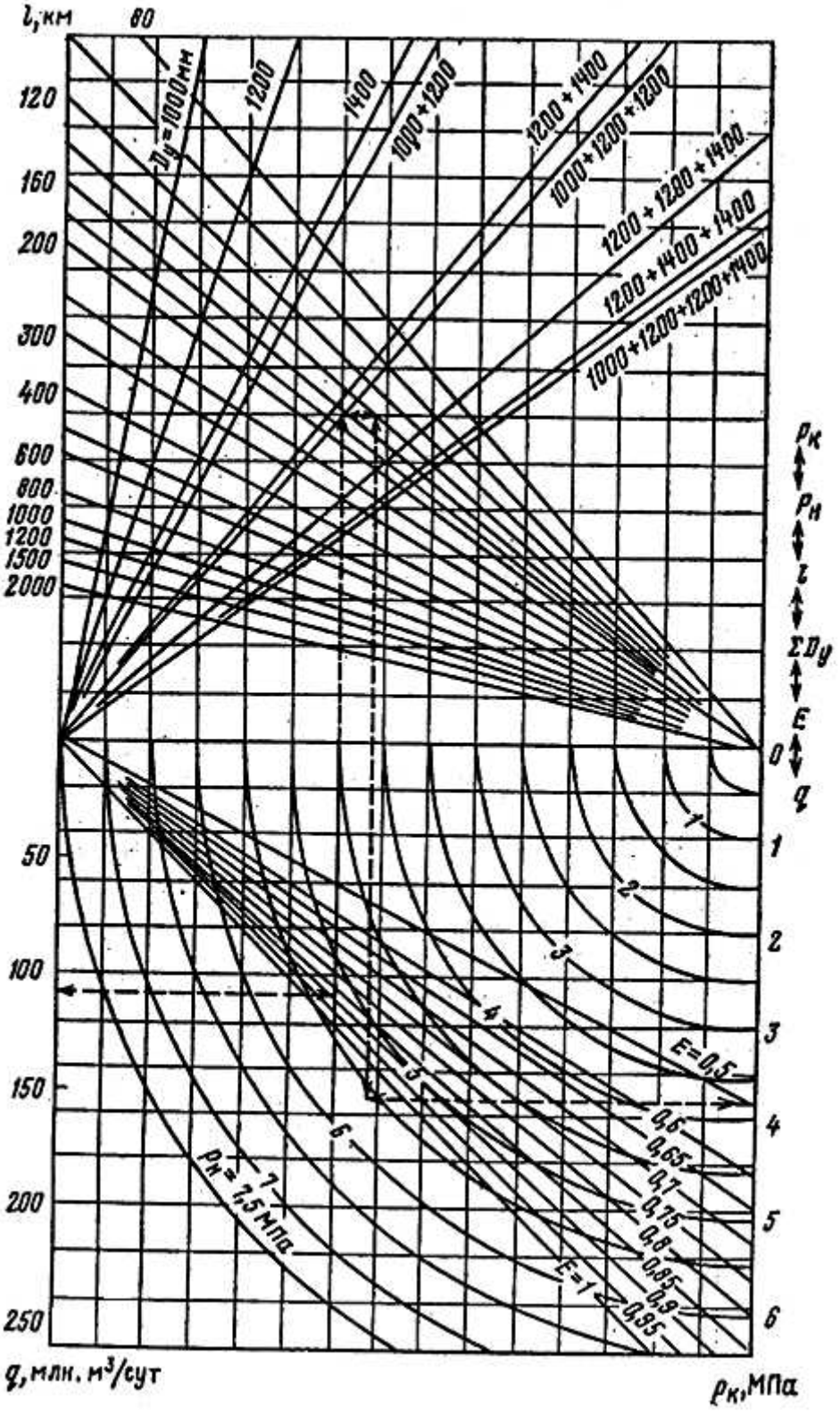


Рис. 4.12. Номограмма для определения пропускной способности участка газопровода и конечного давления газа ($D_{\text{у}} \geq$ 1000 мм, $l \leq$ 2000 км)

Файл скачан с www.turbinist.ru

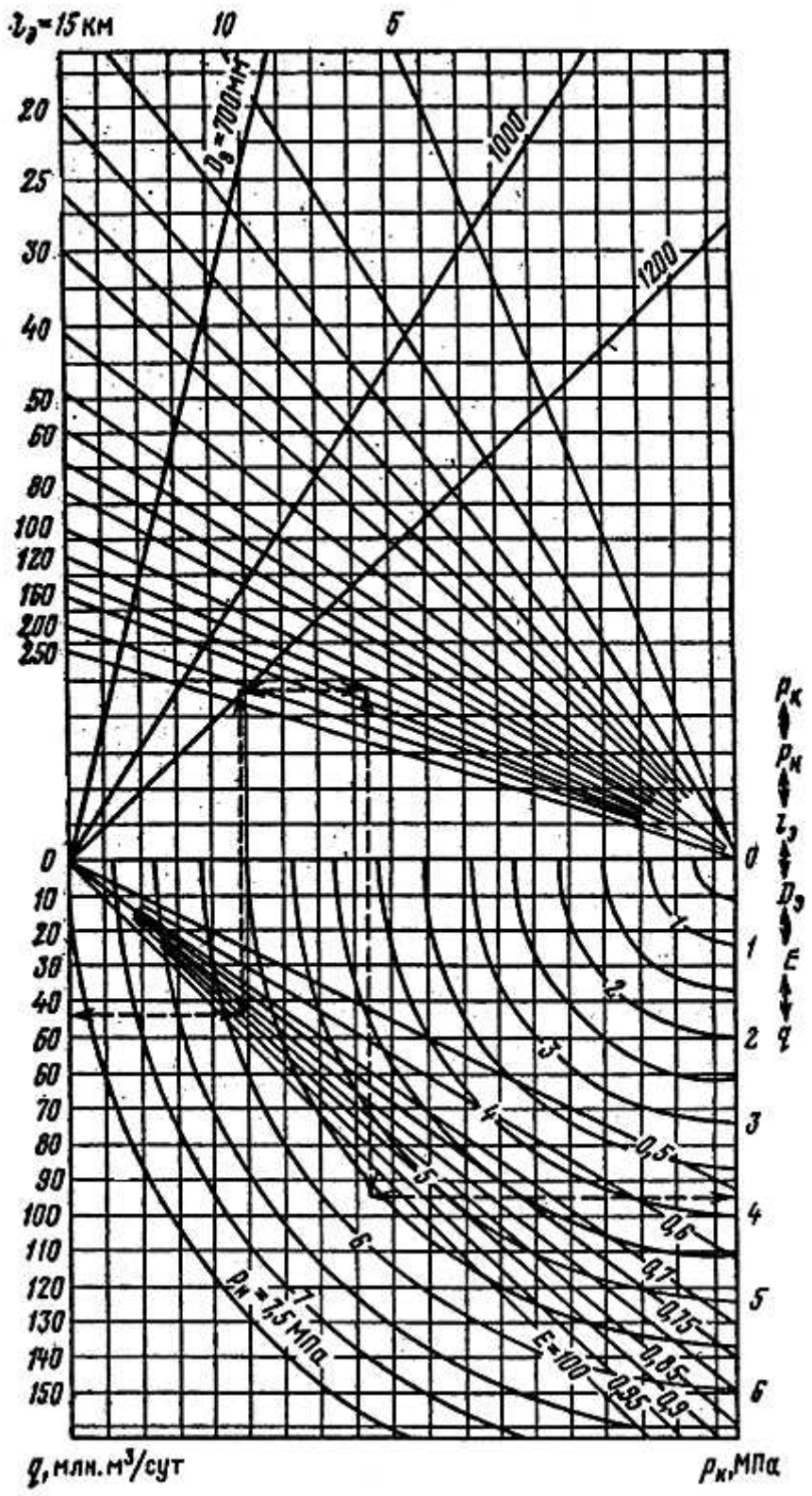


Рис. 4.13. Номограмма для определения пропускной способности эквивалентного газопровода и конечного давления газа

Файл скачан с www.turbinist.ru

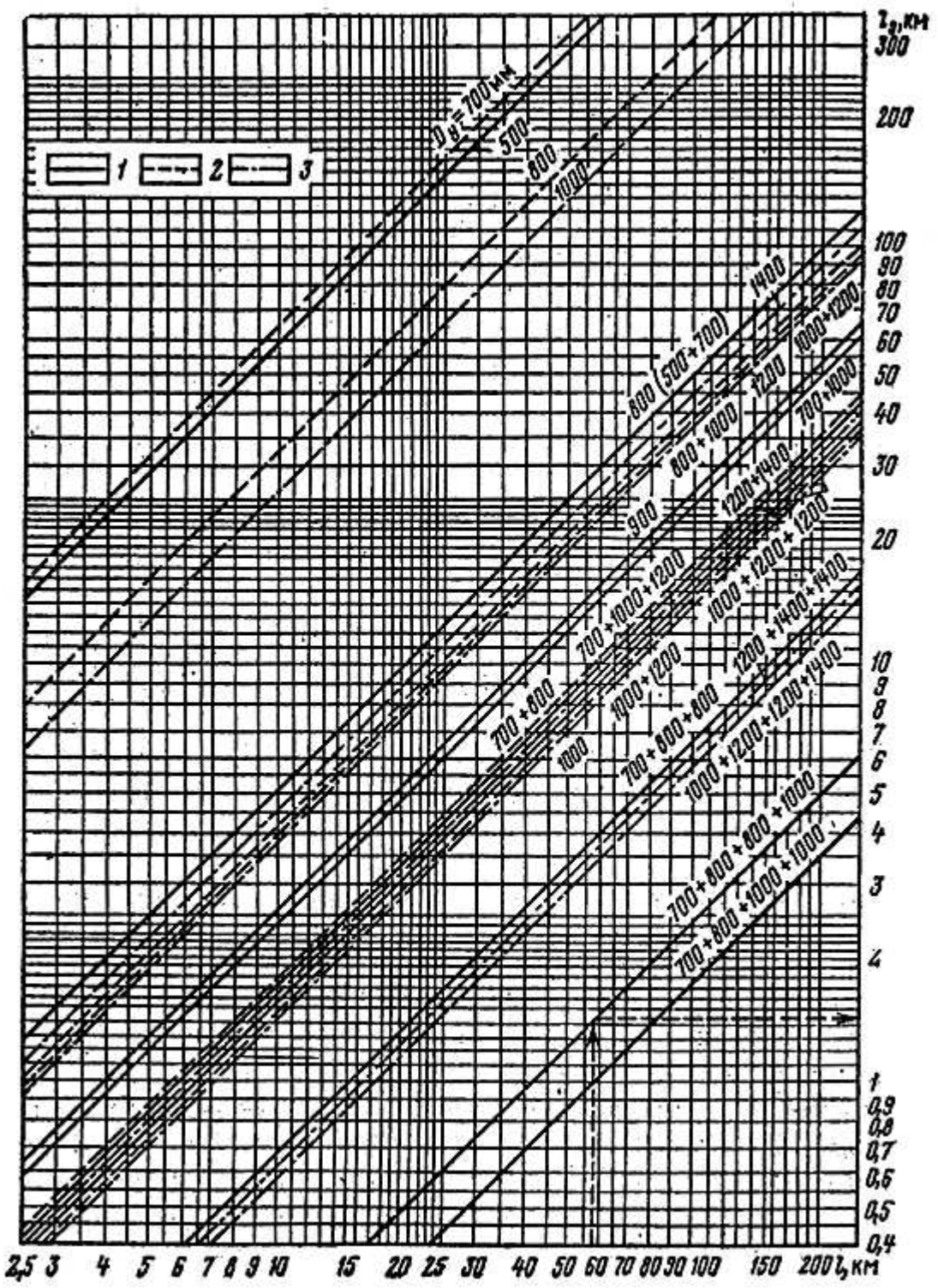


Рис. 4.14. Номограмма для определения эквивалентной длины многониточного газопровода:

1 - $D_э$ = 700 мм; 2 - $D_э$ = 1000 мм; 3 - $D_э$ = 1200 мм

Файл скачан с www.turbinist.ru

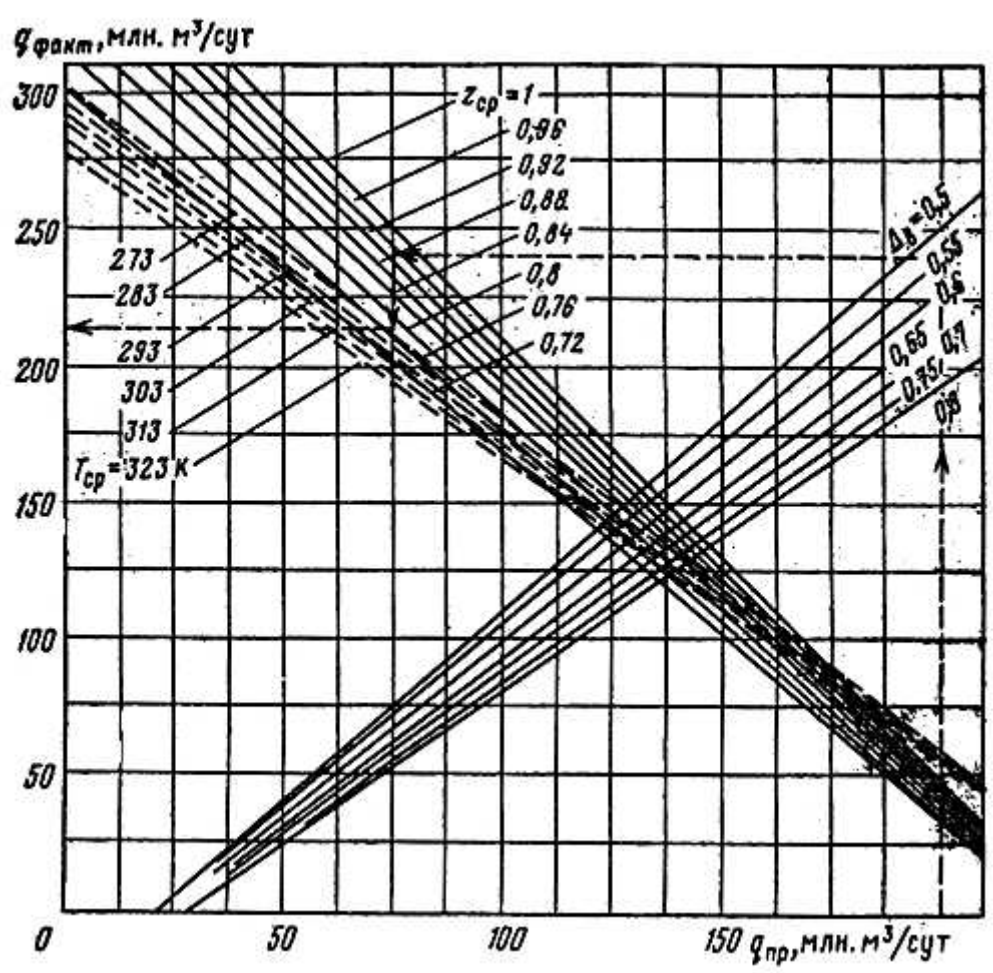


Рис. 4.15. Номограмма для определения фактической и приведенной пропускной способности участка газопровода:

$$q_{пр} \leftarrow\rightarrow \Delta_в \leftarrow\rightarrow z_{ср} \leftarrow\rightarrow T_{ср} \leftarrow\rightarrow q_{факт}$$

Пример 4.3. Определить эффективность работы газопровода диаметром 1220 мм протяженностью l = 125 км при начальном давлении $p_н$ = 5,6 МПа, конечном давлении $p_к$ = 3,8 МПа и пропускной способностью газа q = 45 млн. м^3 /сут.

Решение

По номограмме на рис. 4.8 определяем

$p_к$ = 3,8 МПа $\rightarrow$ $p_н$ = 5,6 МПа $\rightarrow$ l = 125 км $\rightarrow$ q = 45 млн. м^3 /сут $\rightarrow$ $D_у$ = 1220 мм $\rightarrow$ E = 92 %.

Пропускную способность участка многониточного газопровода q и конечное давление газа $p_к$ определяют по номограмме на рис. 4.11 при диаметре ниток $D_у$ = 1220 мм, длине участка l = 1500 км, начальном давлении $p_н$ = 5,6 МПа и по номограмме на рис. 4.12 при диаметре ниток более 1000 мм, длине участка до 2000 км, начальном давлении до 7,5 МПа.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Пример 4.4. Определить пропускную способность участка газопровода диаметром $D_у$ = 1200 мм протяженностью l=140 км при начальном и конечном давлениях соответственно $p_н$ = 5,6 МПа и $p_к$ = 3,8 МПа и эффективности работы газопровода E = 0,9.

Решение

По номограмме на рис. 4.11 определяем

$p_к$ = 3,8 МПа $\rightarrow$ $p_н$ = 5,6 МПа $\rightarrow$ l = 140 км $\rightarrow D_у$ = 1200 мм $\rightarrow$ E = 0,9 $\rightarrow q$ = 41,7 млн. м^3/сут.

Пример 4.5. Определить конечное давление газа в трехниточном газопроводе ($D_у$ = 1000 мм, $D_у$ = 1200 мм и Dy = 1200 мм) протяженностью l = 140 км при начальном давлении $p_н$= 5,6 МПа, пропускной способности газа q = 108 млн. м^3/сут и эффективности работы E = 0,9.

Решение

По номограмме на рис. 4.12 определяем

q = 108 млн. м^3/сут $\rightarrow$ E = 0,9 $\rightarrow \sum D_у$ = 1000 + 1200 + 1200 мм $\rightarrow$ l = 140 км $\rightarrow$ $p_н$ = 5,6 МПа $\rightarrow$ $p_к$ = 3,8 МПа.

Номограммы 4.8-4.12 пригодны для определения гидравлических характеристик многониточного газопровода, состоящего из ниток постоянного диаметра протяженностью, равной протяженности рассчитываемого участка газопровода, т. е. для наиболее характерного случая. Однако в некоторых проектах и при поэтапном строительстве предусматривается прокладка лупингов протяженностью менее длины участка или переход с одного диаметра на другой. Для таких случаев предлагается определять пропускную способность газопровода, конечное давление газа и эффективность его работы по номограммам на рис. 4.8, 4.9, 4.10 и 4.13 с предварительным графическим определением эквивалентной длины такого газопровода по номограмме на рис. 4.14. При этом рекомендуется приводить реальный многониточный газопровод с лупингами к эквивалентному с диаметром $D_э$, наиболее часто встречающемуся на рассчитываемом участке.

Эквивалентная длина такого газопровода определяется по формуле $l_э = \sum_{j=1}^{s} l_{эj}$, где $l_{эj}$ - эквивалентная длина j-го участка с постоянным диаметром и числом ниток; s - число таких участков.

Пример 4.6. Определить эквивалентную длину $l_э$ газопровода диаметром $D_у$ = 1200 мм протяженностью l= 136 км при прокладке лупинга $D_у$ = 1000 мм протяженностью l = 30 км. Определить пропускную способность q этого газопровода при начальном и конечном давлениях соответственно $p_н$ = 5,6 МПа и $p_к$ = 3,8 МПа и эффективности работы E = 0,9.

Решение

По номограмме на рис. 4.14 определяем эквивалентную длину газопровода на участке с лупингом, приводя его к однониточному с эквивалентным диаметром $D_э$ = 1200; мм: $l_э$ = 30

Файл скачан с www.turbinist.ru

$\rightarrow D_{\text{у}}$ = 1000 + 1200 мм $\rightarrow l_{\text{э}}$ = 14 км. Эквивалентная длина всего газопровода $l_{\text{э}}$ = 136 - 30 + 14= 120 км. По номограмме на рис. 4.13 определяем

$p_{\text{к}}$ = 3,8 МПа $\rightarrow$ $p_{\text{н}}$ = 5,6 МПа $\rightarrow l_{\text{э}}$ = 120 км $\rightarrow$ $D_{\text{э}}$ = 120 мм $\rightarrow$ E = 0,9 $\rightarrow$ q = 44 млн. м^3 /сут.

Пример 4.7. Определить эквивалентную длину газопровода диаметром $D_{\text{у}}$ = 1200 мм протяженностью l = 157,8 км, имеющего два лупинга $D_{\text{у}}$ = 1400 мм протяженностью $l_{\text{л}}$ = 20 км и $D_{\text{у}}$ = 1000 мм протяженностью l_2 = 30 км. Кроме того, определить эффективность работы этого газопровода при начальном и конечном давлениях соответственно $p_{\text{н}}$ = 5,6 МПа, $p_{\text{к}}$ = 3,8 МПа и пропускной способности газа q = 45 млн. м^3 /сут.

Решение

По номограмме на рис. 4.14 определяем эквивалентную длину газопровода на участке с лупингами, приводя их к однониточнону газопроводу с $D_{\text{э}}$ = 1200 мм:

l_1 = 20 $\rightarrow$ $D_{\text{у}}$ = 1200 + 1400 мм $\rightarrow$ $l_{\text{э1}}$ = 3,2 км;

l_2 = 30 $\rightarrow$ $D_{\text{у}}$ = 1000 + 1200 мм $\rightarrow$ $l_{\text{э2}}$ = 14 км.

Определяем эквивалентную длину газопровода

$l_{\text{э}}$ = 157,8 - (20+30) + (3,2 + 14)= 125 км.

По номограмме на рис. 4.8 определяем:

$p_{\text{к}}$ = 3,8 МПа $\rightarrow$ $p_{\text{н}}$ = 5,6 МПа $\rightarrow l$ = 125 км $\rightarrow$ q = 45 млн. м^3 /сут $\rightarrow D_{\text{у}}$ = 1200 мм $\rightarrow$ E = 0,92.

Отклонение фактических значений относительной плотности газа по воздуху, средних коэффициентов сжимаемости и температуры от принятых при построении номограмм 4.8-4.13 значений в большинстве случаев дают погрешности при расчете не более 3 %. Для определения точных значений пропускной способности участка газопровода и, наоборот, для приведения фактической пропускной способности к указанным значениям можно воспользоваться номограммой на рис. 4.15.

Пример 4.8. Определить фактическую пропускную способность при $q_{\text{пр}}$ = 200 млн. м^3 /сут, Δ = 0,55, $z_{\text{ср}}$ = 0,92, $t_{\text{ср}}$ = 0 °С.

Решение

По номограмме на рис. 4.15 определяем

$q_{\text{пр}}$ = 100 млн. м^3 /сут $\rightarrow$ Δ = 0,55 $\rightarrow z_{\text{ср}}$ = 0,92 $\rightarrow$ $t_{\text{ср}}$ = 273 К $\rightarrow$ $q_{\text{факт}}$ = 212 млн. м^3 /сут.

Файл скачан с www.turbinist.ru

4.4. РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Потери давления в поворотных коленах, сужениях, расширениях, задвижках, вентилях рассчитывают по формуле

$$\Delta p = \rho \frac{\omega^2}{2} \zeta,$$

где ρ - плотность газа; ω - скорость газа; ζ - коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления определяется, как правило, экспериментально и при расчетах берется из соответствующих таблиц и графиков. При расчетах газопроводов местные сопротивления учитывают введением дополнительной эквивалентной длины, гидравлическое сопротивление которой равно сумме местных сопротивлений $l_э = \sum \zeta D / \lambda$, где D - диаметр газопровода; λ - коэффициент гидравлического сопротивления.

Расчетная длина газопровода определяется в виде суммы $l_{расч} = l_д + l_э$, где $l_д$ - действительная длина газопровода.

В области ламинарного течения величина ζ зависит от числа Рейнольдса и геометрической формы местного сопротивления и может быть определена на формуле $\zeta = A/Re + \zeta_{кв}$, где A - коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления; $\zeta_{кв}$ - коэффициент местного сопротивления в квадратичной зоне.

Значения коэффициентов A и $\zeta_{кв}$ для наиболее распространенных на газопроводах местных сопротивлений (арматуры)

Коэффициент	A	$\zeta_{кв}$
Пробковый кран	150	0,4
Колено 90°	130	0,2
Тройник	150	0,3
Диафрагма $(d/D)^2$:		
0,64	70	1
0,4	120	7
0,16	500	70
0,05	3200	800

Приведем значения коэффициентов местного сопротивления гнутых труб при плавных поворотах радиуса трубы, когда угол не превышает 90°, для различных отношений диаметра трубы к радиусу изгиба.

Коэффициент местного сопротивления ζ гнутых труб 90°

Файл скачан с www.turbinist.ru

D/R	0,4	0,6	0,8	1	
Трубы:					
гладкие	0,14	0,16	0,21	0,29	
шероховатые	0,28	0,32	0,42	0,58	
D/R	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Трубы:					
гладкие	0,44	0,66	0,98	1,41	1,93
шероховатые	0,88	1,32	1,96	2,82	3,96

Значения коэффициентов местного сопротивления ζ тройников приведены в табл. 4.9 (где $Q_{\text{общ}}$ - расход газа по основной трубе; $q_{\text{в}}$ - расход газа по отводу).

Таблица 4.9

Местные сопротивления ζ тройников

$q_{\text{в}}/Q_{\text{общ}}$	Отбор газа		Приток газа	
	ζ на проход	ζ на ответвление	ζ на проход	ζ на ответвление
0	0,96	0,05	-1,04	0,06
0,1	0,91	-0,04	-0,68	0,11
0,2	0,88	-0,08	-0,4	0,18
0,3	0,88	-0,08	-0,15	0,24
0,4	0,89	-0,04	0,1	0,3
0,5	0,92	0	0,3	0,35
0,6	0,96	0,07	0,47	0,4
0,7	1,02	0,14	0,6	0,46
0,8	1,1	0,21	0,73	0,5
0,9	1,2	0,28	0,83	0,55
1	1,29	0,35	0,92	0,6

4.5. АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ВРЕМЯ ОПОРОЖНЕНИЯ ГАЗОПРОВОДА

Файл скачан с www.turbinist.ru

Запас газа в магистральном газопроводе обычно определяют по участкам (между компрессорными станциями) и затем суммируют. Запас газа (в млн. м^3) на участке многониточного магистрального газопровода рассчитывают по формуле

$$V \approx \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i p_{ср} l \cdot 293 \cdot 10{,}2}{z_{ср} \cdot 10^6 \cdot T_{ср}},$$

где n - число ниток магистрального газопровода; v_i - геометрический объем i - й нитки газопровода длиной 1 км, м^3 (табл. 4.10); $p_{ср}$ - среднее давление на участке магистрального газопровода, МПа; l - длина участка магистрального газопровода, км; $z_{ср}$ - средний коэффициент сжимаемости; $T_{ср}$ - средняя температура газа, К.

Таблица 4.10

Геометрический объем v_i газопровода длиной 1 км

$D_у$, мм	v_i, м^3	$D_у$, мм	v_i, м^3
150	17,7	600	283
200	31,4	700	385
250	49,1	800	502
300	70,5	1000	785
350	91	1200	1130
400	125,8	1400	1540
500	196,3		

Среднее давление на участке, коэффициент сжимаемости, запас газа в многониточном газопроводе можно определить по номограммам на рис. 4.16-4.19 ($T_{ср} = T_1 = 298 \div 323$ К; $T_{ср} = T_2 = 283 \div 298$ К; $T_{ср} = T_3 = 323 \div 348$ К).

Файл скачан с www.turbinist.ru

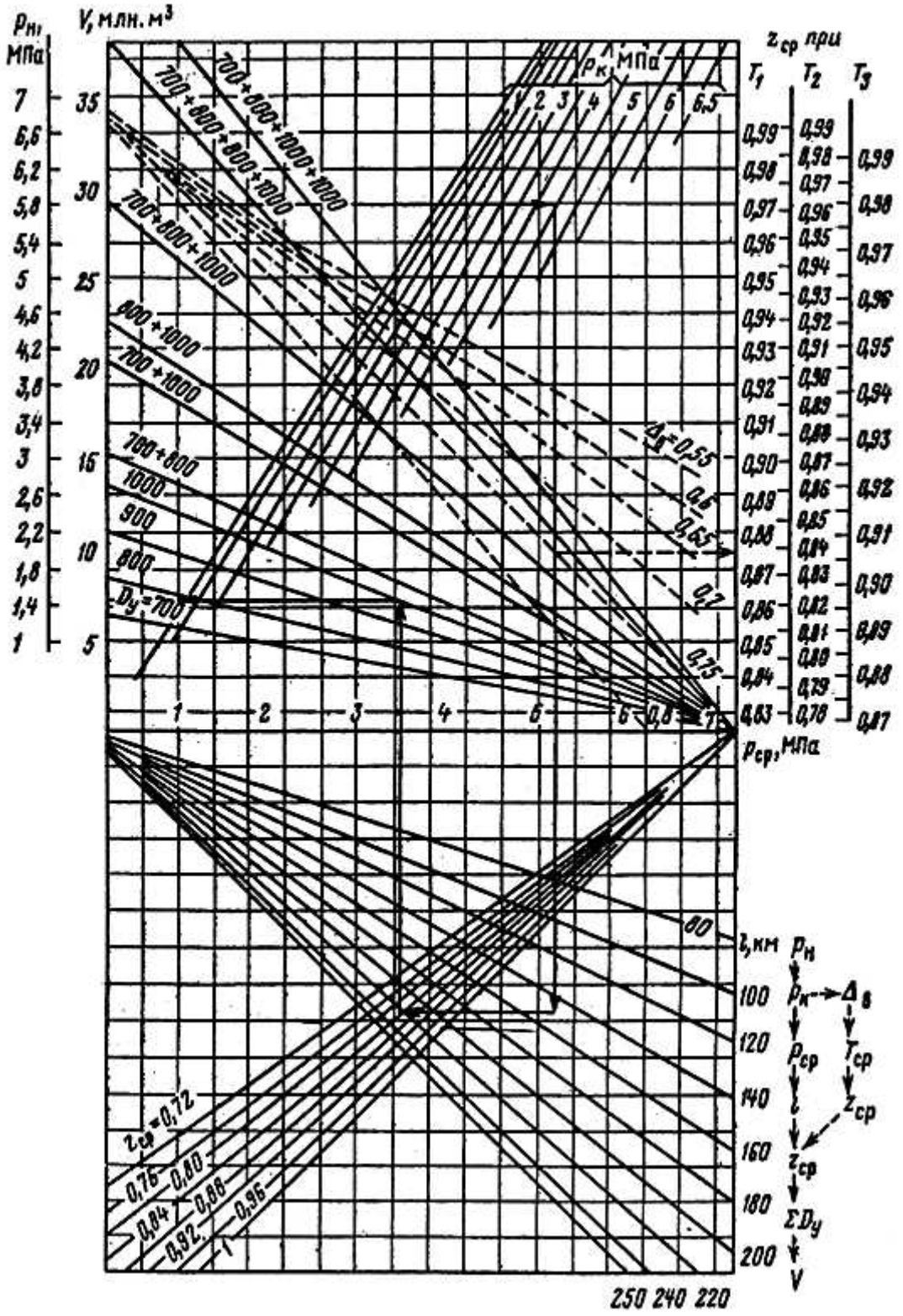


Рис. 4.16. Номограммы для определения среднего давления, коэффициента сжимаемости и запаса газа в многониточном газопроводе при $D_у \leq 1000$ мм и $l \leq 250$ км

Файл скачан с www.turbinist.ru

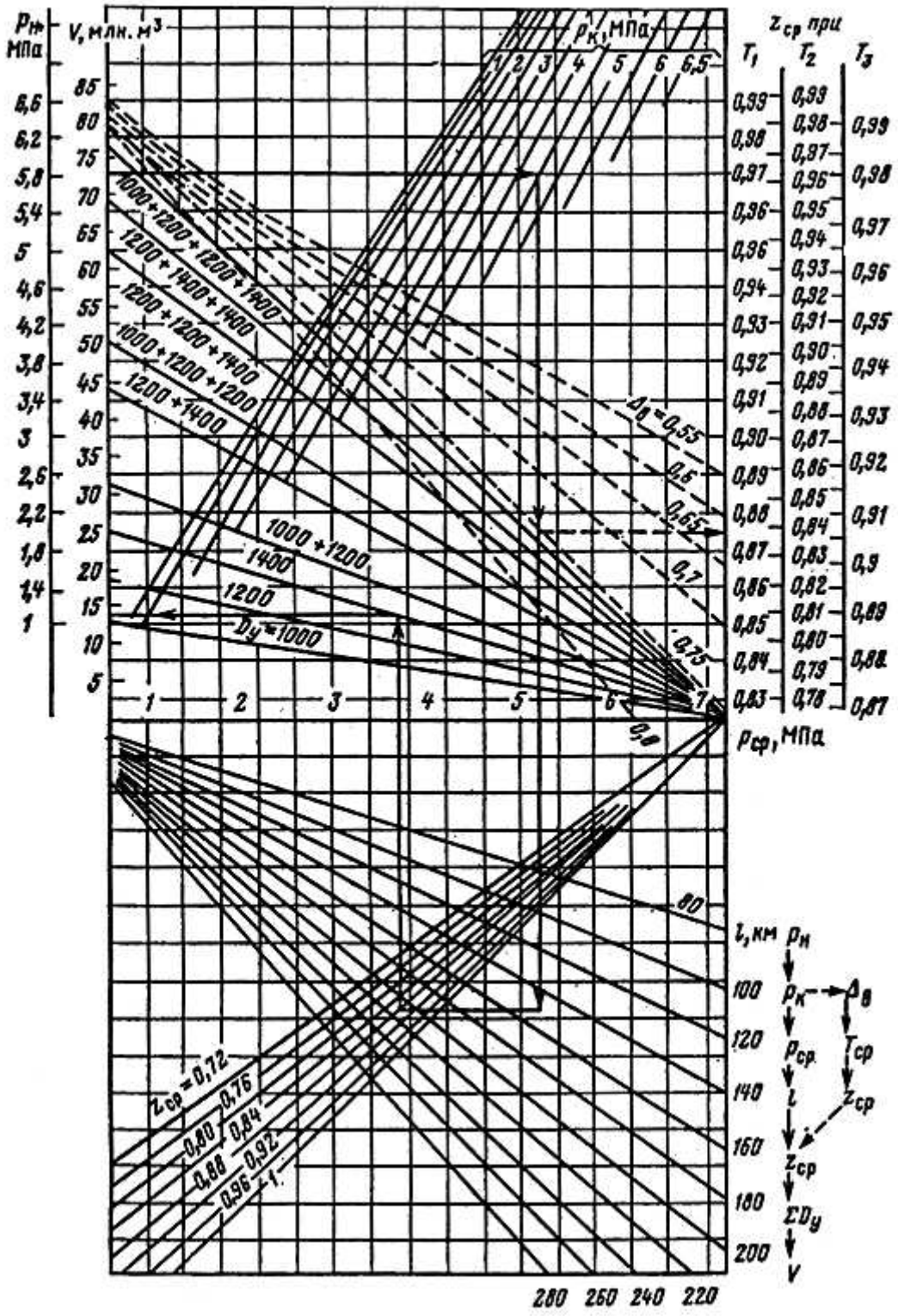


Рис. 4.17. Номограмма для определения среднего давления, коэффициента сжимаемости и запаса газа в многониточном газопроводе при $D_y \geq 1000$ мм и $l \leq 250$ км

Файл скачан с www.turbinist.ru

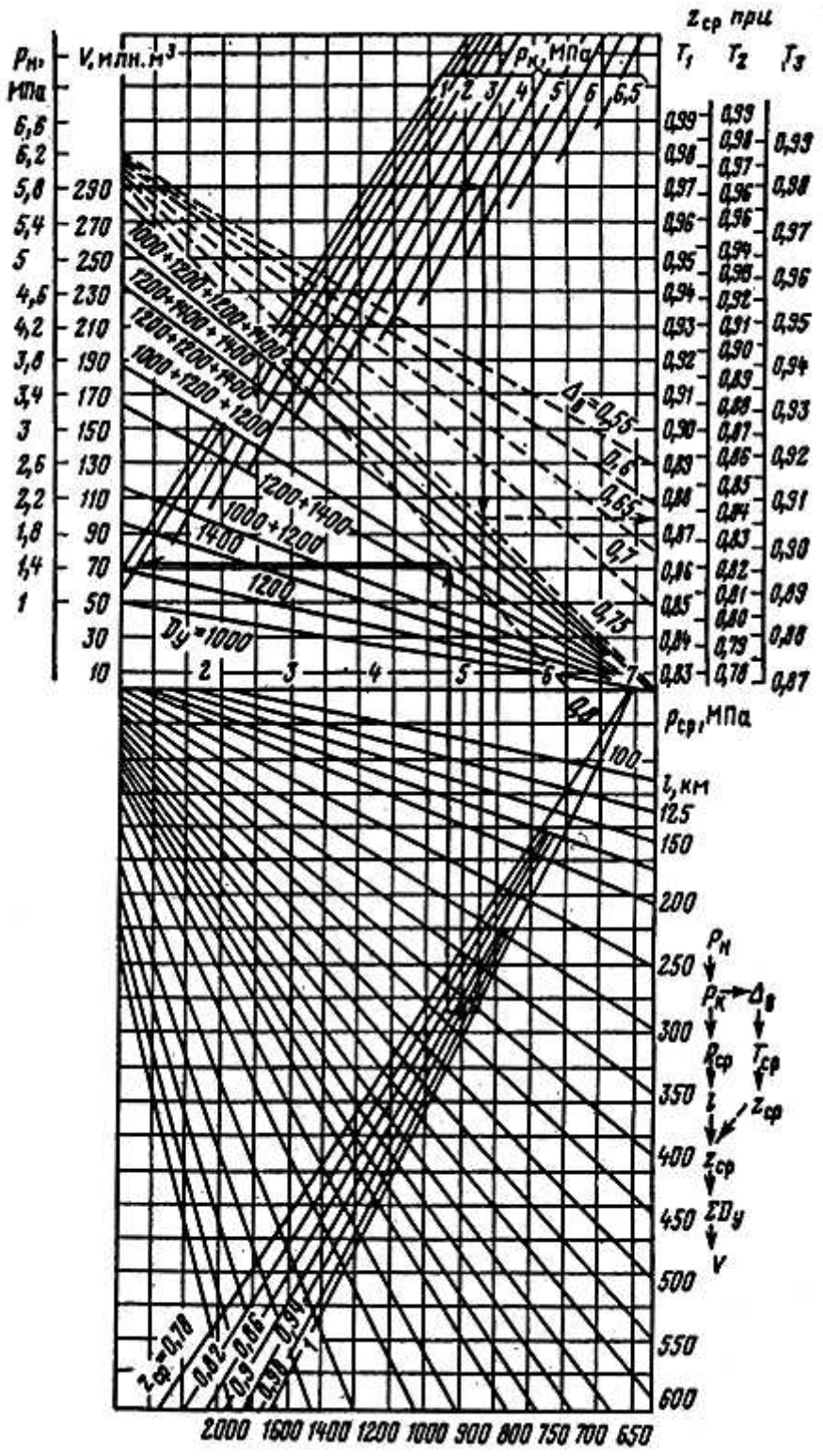


Рис. 4.18. Номограмма для определения среднего давления, коэффициента сжимаемости и запаса газа в многониточном газопроводе при $D_{\text{у}} \leq 1000$ мм и $l \leq 2000$ км

Файл скачан с www.turbinist.ru

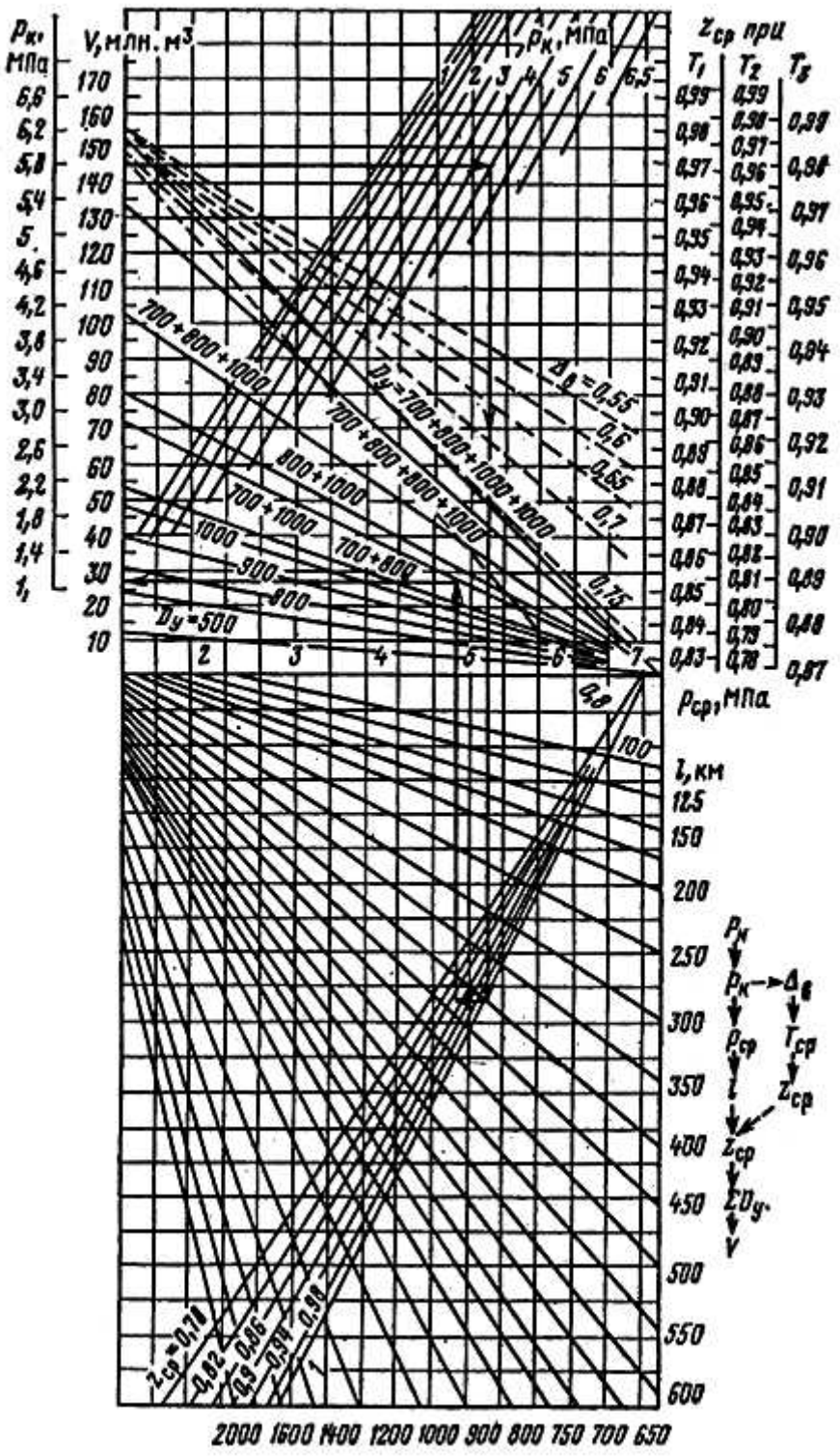


Рис. 4.19. Номограмма для определения среднего давления, коэффициента сжимаемости и запаса газа в многониточном газопроводе при $D_y \geq 1000$ мм и $l \leq 2000$ км

Пример 4.9. Определить запас газа в газопроводе длиной 400 км, состоящем из трех ниток (при D_y равном 1000, 1200 и 1200 мм). Начальное давление газа $p_н$ = 5,8 МПа, конечное

Файл скачан с www.turbinist.ru

давление $p_к$ = 4,5 МПа, относительная плотность по воздуху Δ = 0,75, средняя температура газа $t_{ср}$ = 30 °С.

Решение

По номограмме на рис. 4.19 определяем

$p_н$ = 5,8 МПа $\rightarrow$ $p_к$ = 4,5 МПа $\rightarrow$/ Δ = 0,75 $\rightarrow$ $T_{ср}$ = 303 К $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,875/ $\rightarrow$ $p_{ср}$ = 5,2 МПа $\rightarrow$ l = 400 км $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,875 $\rightarrow$ $D_у$ = 1000 + 1200 + 1200 мм $\rightarrow$ V = 72 млн. м^3.

Пример 4.10. Газопровод диаметром 1200 мм, длиной 180 км транспортирует газ $\Delta_в$ = 0,65, $T_{ср}$ = 303 К, $p_н$ = 4,8 МПа и $p_к$ = 3,2 МПа. Определить количество газа, которое необходимо для заполнения газопровода при его испытании на давление 6,15 МПа.

Решение

По номограмме на рис. 4.17 определяем

фактический запас газа

$p_н$ = 4,8 МПа $\rightarrow$ $p_к$ = 3,2 МПа $\rightarrow$/ $\Delta_в$ = 0,65 $\rightarrow$ $T_{ср}$ = 303 К $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,92/ $\rightarrow$ $p_{ср}$ = 4,1 МПа $\rightarrow$ l = 180 км $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,92 $\rightarrow$ $D_у$ = 1200 мм $\rightarrow$ V = 8,5 млн. м^3;

запас газа при давлении испытания

$p_{исп}$ = $p_{ср}$ = 6,15 МПа $\rightarrow$/ $\Delta_в$ = 0,65 $\rightarrow$ $T_{ср}$ = 303 К $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,885 /$\rightarrow$ l = 180 км $\rightarrow$ $z_{ср}$ = 0,885 $\rightarrow$ $D_у$ = 1200 мм $\rightarrow$ V = 13,5 млн. м^3;

необходимое увеличение запаса газа в трубе

13,5 - 8,5 = 5 млн. м^3.

Определение времени опорожнения газопровода

Приближенно время опорожнения газопровода через продувочную свечу можно определить по номограмме на рис. 4.20, составленной для метана при 288 К. На графике приняты следующие обозначения: $D_{вн}$ - внутренний диаметр газопровода; $d_{вн}$ - внутренний диаметр продувочной свечи; m - отношение рабочего сечения крана к сечению продувочной свечи; l - длина участка газопровода; p - давление в газопроводе; τ - время опорожнения участка газопровода.

Файл скачан с www.turbinist.ru

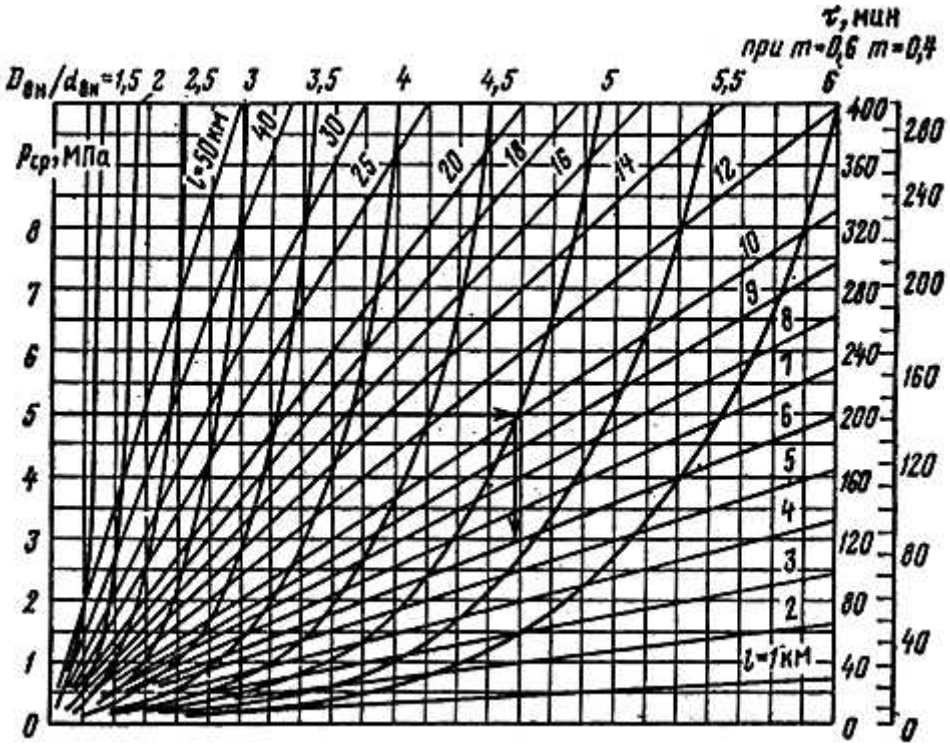


Рис. 4.20. Номограмма для определения времени опорожнения газопровода:

$$p_{ср} \rightarrow D_{вн}/d_{вн} \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow \tau$$

Величина m на практике принимается обычно равной 0,3-0,4. При других значениях m, отличных от приведенных на графике, время опорожнения участка газопровода пересчитывают по формуле $\tau' = \tau\ 0{,}4/m$, где τ - время опорожнения участка газопровода при $m = 0{,}4$.

Пример 4.11. Определить время опорожнения газопровода при среднем давлении $p_{ср} = 5$ МПа, $D_{вн}/d_{вн} = 5$, $l = 6$ км, $m = 0{,}4$.

Решение

По графику на рис. 4.20

$p_{ср} = 5$ МПа $\rightarrow$ $D_{вн}/d_{вн} = 5$ $\rightarrow$ $l = 6$ км $\rightarrow$ $m = 0{,}4$ $\rightarrow$ = 118 мин.

Переход в начало документа осуществляется по ссылке

4.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУТОЧНОЙ ПОТЕРИ ГАЗА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЕГО ИЗ ОТВЕРСТИЯ В ТЕЛЕ ТРУБЫ

Файл скачан с www.turbinist.ru

Полное количество тепла, полученное телом (δQ), характеризует термодинамический теплообмен и определяется как сумма двух величин - теплотые, подведенной извне (δQ*), и теплоты внутреннего теплообмена (δQ**) - первое начало термодинамики

$$\delta Q = \delta Q^{**} + \delta Q^{*}.$$

Термодинамический процесс изменения состояния вещества, выражающийся уравнением $\delta Q = 0$, называется адиабатическим, $\delta Q^{*} = 0$ - внешнеадиабатическим. Определение суточной потери газа через неплотности осуществляется с учетом предложения о том, что процесс истечения внешнеадиабатический. Уравнение Клапейрона принимается в качестве уравнения состояния газа. В момент достижения критической скорости истечения постоянный показатель политропического процесса истечения равен показателю реального внешнеадиабатического процесса k в критическом сечении потока ($n = k = 1{,}3$).

Режим истечения газа из отверстий - критический, величина соотношения давлений:

$$B = p_{\text{кр}} / p_{\text{о}} = \left[2/(n-1)\right]^{\frac{n}{n-1}},$$

где $p_{\text{кр}}$ - критическое давление; p_0 - исходное, начальное давление; n - показатель политропы.

Скоростная характеристика расхода газа

$$\lambda_{\text{кр}} = B / 2\sqrt{n(n+1)}.$$

Критическая массовая скорость истечения

$$u_{\text{кр}} = \lambda_{\text{кр}} \sqrt{2gp_0 / \nu_0},$$

где g - ускорение свободного падения; ν_0 - начальный удельный объем;

$$\nu_0 = \frac{RT}{p} = \frac{\overline{R}}{M}\frac{T}{p},$$

где R - газовая постоянная; T - температура газа; p - давление газа; $\overline{R}$ - универсальная газовая постоянная, M - молекулярная масса

$$M = \sum_{s=1}^{k} M_s r_s,$$

M_s - молекулярная масса компонентов смеси газов (табл. 4.11); r_s - процентное содержание газа в смеси.

Таблица 4.11

Молекулярная масса газов

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса

Файл скачан с www.turbinist.ru

Азот	N_2	28,016
Водород	H_2	2,016
Гелий	He	4,003
Диоксид серы	O_2	64,066
Диоксид углерода	CO_2	44,011
Метан	CH_4	16,043
Оксид азота	NO	30,008
Оксид углерода	CO	28,011
Пропан	C_3H_8	44,097
Сероводород	H_2	34,082
Этан	C_2H_6	30,07

Расчетное выражение критического расхода в секунду:

$$G_{\text{сек}} = fu_{\text{кр}} = f\lambda_{\text{кр}}\sqrt{2qp_{\text{о}}/v_{\text{о}}},$$

где f - площадь сечения отверстия.

Пример 4.12. В одном из соединений газопровода образовалась неплотность, эквивалентная отверстию в 1 мм^2. Давление газа 6 МПа, температура 40 °С. Состав газа: 95 % CH_4; 4 % C_2H_6; 1 % N_2. Определить суточную потерю газа.

Решение

Молекулярная масса смеси

$$M = 16{,}043 \cdot 0{,}95 + 30{,}07 \cdot 0{,}04 + 28{,}016 \cdot 0{,}01 = 16{,}7228.$$

Температура газа $T = 273{,}15 + 40 = 313{,}15$ К.

Начальный удельный объем газа

$$v = 847{,}83/16{,}7228 \cdot 313{,}15/(60 \cdot 10^4) = 0{,}02646 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Величина соотношения давлений

$$B = \left(\frac{2}{1{,}3+1}\right)^{\frac{1{,}3}{1{,}3-1}} = 0{,}5457.$$

Скоростная характеристика расхода газа

$$\lambda_{\text{кр}} = 0{,}5457\sqrt{1{,}3(1{,}3+1)} = 0{,}4718.$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

При решении аналогичных задач, связанных с определением утечек, характеристика расхода газа принимается равной $\lambda_{кр} = 0{,}4718$.

Критическая массовая скорость истечения

$$u_{кр} = 0{,}4718\sqrt{2 \cdot 9{,}80665 \frac{60 \cdot 10^4}{0{,}02646}} = 9949{,}8 \frac{кг}{м^3 / с}.$$

Суточный расход газа

$$G_{сут} = 24 \cdot 3600 \cdot 9949{,}8 \cdot 10^{-6} = 859{,}66 \text{ кг/сут}.$$

Столь значительные величины потерь газа требуют немедленной ликвидации появившихся свищей.

4.7. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Основные формулы и номограммы

Для расчета теплового режима магистрального газопровода с рабочим давлением до 7,5 МПа рекомендуется (по методике ВНИИГаза) формула, учитывающая влияние эффекта Джоуля-Томпсона:

$$t = t_{гр} + \left(t_н - t_{гр}\right)e^{-ax} - D_i \frac{p_н^2 - p_к^2}{2lap_{ср}}\left(1 - e^{-ax}\right),$$

где

$$ax = 0{,}225 \cdot 10^6 \frac{k_m d_н x}{q \Delta c_p \cdot 10^6},$$

$t_{гр}$ - температура грунта на глубине заложения оси газопровода, °С; $t_н$ - температура газа в начале участка газопровода, °С; e - основание натуральных логарифмов (e = 2,718); x - расстояние от начала участка до рассматриваемой точки, км; D_i - эффект Джоуля-Томпсона; $p_н$ и $p_к$ - давления в начале и конце рассматриваемого участка, МПа; l - длина участка газопровода, км; $p_{ср}$ - среднее давление газа на участке, МПа, k_m - коэффициент теплопередачи от газа к грунту, кДж/(м^2 ·ч·°С); $d_н$ - наружный диаметр газопровода, мм; q - расход газа, млн. м^3/сут; Δ - относительная плотность газа по воздуху; c_p - теплоемкость газа (для приближенных расчетов $c_p \approx 2{,}51$ кДж/(кг· °С).

Величину e^{-ax} можно определить по табл. 4.12. Температура грунта и воздуха для различных районов и времени года приведены в табл. 4.13 и 4.14. Эти параметры могут быть определены и по СНиП 2.01.01-82 в разделе "Строительная климатология и геофизика".

Таблица 4.12

Файл скачан с www.turbinist.ru

Значения величины e^{-ax}

ax	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,0000	0,9990	0,9980	0,9970	0,9960	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0	1,0000	0,9900	0,9802	0,9704	0,9608	0,9512	0,9418	0,9324	0,9231	0,9139
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6869	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5827	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1	0,3679	0,3329	0,3012	0,2725	0,2466	0,2231	0,2019	0,1827	0,1653	0,1496
2	0,1353	0,1225	0,1108	0,1103	0,0907	0,0821	0,0743	0,0672	0,0608	0,0550
3	0,0498	0,0450	0,0408	0,0369	0,0334	0,0302	0,0273	0,0247	0,0224	0,0202
4	0,0183	0,0166	0,0150	0,0136	0,0123	0,0111	0,0100	0,0091	0,0082	0,0074
5	0,0067	0,0061	0,0055	0,0050	0,0045	0,0041	0,0037	0,0034	0,0030	0,0027
6	0,0025	0,0022	0,0020	0,0018	0,0017	0,0015	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010
7	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
8	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
9	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000

Таблица 4.13

Температура грунта (в °С) на различных глубинах в некоторых пунктах СССР

Пункты	h, м	Месяцы												$t_{ср}$, °С
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Актюбинск	0,4	-3,7	-3,6	-1,9	4,5	14,4	19,7	22	21,5	16,4	9	2	-1,9	8,2
	0,8	-1,4	-1,8	-1,1	3,3	11,8	16,9	19,6	19,8	16,6	10,4	4,5	0,8	8,3

Файл скачан с www.turbinist.ru

	1,6	2,6	1,5	1,2	2,4	8	12,7	15,6	16,7	15,6	12,2	8,2	4,8	8,5
Алма-Ата	0,8	2,3	1,4	2,4	7,5	12,5	16,3	19,2	20,5	18,8	14,3	8,4	4,5	10,7
	1,2	4,6	3,5	3,2	6,4	10,7	14,3	17,1	18,7	18,2	15,2	10,6	6,2	10,8
	1,6	6,1	4,7	4,2	6,2	9,8	13	15,6	17,4	17,4	15,5	11,8	8,5	10,8
Архангельск	0,8	0,4	0	-0,1	0	0,8	5	10,8	12,6	9,6	5,7	2,6	1,1	4
	1,2	2,1	1,6	1,3	1	1,1	3,6	8,1	10,1	9,7	7,2	4,8	3	4,5
	1,6	4	3,5	3,1	2,7	2,5	3	4,5	6	7,1	7	6,1	4,9	4,5
Ашхабад	0,8	8,4	8,6	10,9	15,5	21,2	26	29,3	29,4	26,7	21,8	15,7	10,6	18,7
	1,2	10,6	10	11,4	14,6	19,1	23,5	26,8	27,8	26,2	22,7	17,8	13,2	18,6
	1,6	12,7	11,7	12,2	14,1	17,5	21,3	24,3	25,9	25,3	23	19,4	15,5	18,5
Баку	0,4	6,3	6,5	8,5	13,9	20,8	26	29,1	29,4	25,6	19,6	13,5	8,6	17,3
	0,8	8,7	8,3	9,5	12,8	18,2	22,9	26,3	27,3	25,5	20,7	16,1	11,4	17,3
	1,6	13,6	12,2	11,7	12,6	15,4	18,6	21,4	23,2	21,3	21,4	18,7	15,6	17,3
Березово	0,8	0,3	-0,3	-0,6	-0,3	0	2,2	7,2	9,4	8,1	4,7	2	1	2,8
	1,2	1,1	0,6	0,3	0,1	0,1	0,9	5,2	7,9	7,4	5,4	3	1,8	2,8
	1,6	1,6	1	0,7	0,5	0,4	0,9	3,9	6,8	7,1	5,6	3,5	2,3	2,9
Бухара	0,8	5,1	5,8	4,5	13,8	20,7	25,7	28,9	29,4	26,6	20,9	13,9	8,4	17,2
	1,2	7,4	7,1	8,3	12,6	18,8	23,6	26,8	27,9	26,2	21,8	16,1	10,8	17,3
	1,6	9,2	8,2	8,6	11,9	17,1	21,7	25,1	26,6	25,7	22,4	17,7	12,8	17,7
Волгоград	0,4	-1,3	-1,9	0,4	7,7	16,2	22,7	26	25,3	19,6	12	6,4	0	11
	0,8	0,8	-0,1	0,6	6,2	13,8	19,8	23,5	23,8	20,1	13,9	7,6	2,7	11,1
	1,6	4,3	2,9	2,6	4,9	10,2	15,2	18,8	20,4	19,2	15,6	11,1	6,8	11
Вологда	0,4	0,6	0,2	0,2	0,7	6,5	11,2	14,8	14,7	11,2	6,5	3,2	1,2	5,9
	0,8	1,7	1,3	1,1	1,1	4,9	9,6	13	13,6	11,2	7,4	4,3	2,5	6
	1,6	3,4	2,8	2,3	2,1	3,6	6,8	9,6	11,2	10,6	8,6	6,2	4,4	6
Воронеж	0,8	1,6	1	0,8	3,4	9,2	13,1	16,2	17	14,8	10,7	6,4	3,2	8,1
	1,2	3,4	3,6	3	3,3	6,5	9,7	12,4	14	13,8	11,8	9	6,5	8,1
	1,6	4,6	5,1	4,4	4	5,6	8	13	12	12,6	11,6	9,9	7,9	8,2
Гомель	0,8	1,6	0,6	0,7	3,9	10	14,4	16,7	17,1	14,3	10	5,2	2,6	8,1
	1,2	2,6	1,7	1,4	3,3	8,5	12,5	15,2	16	14,2	10,6	7,1	3,9	8,1

Файл скачан с www.turbinist.ru

	1,6	3,6	2,6	2,1	3,2	7,5	11,5	13,8	15,1	14	11,2	8,2	5,1	8,1
Горький	0,8	1,2	0,8	0,6	1,3	6,8	12	15,2	15,9	13,2	8,6	4,4	2,1	6,8
	1,2	2	1,4	1,2	1,5	5,8	10,4	13,3	14,4	12,8	9,2	5,4	3,1	6,7
	1,6	2,9	2,2	1,8	1,8	4,8	9	12	13,4	12,7	9,8	6,5	4,1	6,8
Грозный	0,8	5,6	4,5	5,3	8,9	14,1	18,1	21,2	22,5	20,8	17,1	12,6	7,9	13,2
	1,2	7,4	6,2	6,3	8,4	12,5	16,2	19,3	20,9	20,3	17,6	14,2	10,1	13,3
	1,6	9,4	8	7,5	8,6	11,5	14,7	17,5	19,3	19,6	18	15,2	11,9	13,9
Джамбул	0,8	0,6	0,5	3,1	9,4	15,7	19,4	23,8	24,5	21,2	14,3	7,4	2,6	11,9
	1,2	3,6	2,8	3,8	8	13,1	16,8	20,3	22	20,5	16,4	10,6	6,6	12
	1,6	5,5	4,2	4,7	7,6	12	15,4	18,5	20,4	19,7	16,9	12	8,4	12,1
Ереван	0,8	4,5	4	6,2	10,8	15,6	20,2	24	25,7	24,5	19	13,3	7,7	14,6
	1,2	9,5	7,4	7,7	10,2	13,4	16,6	19,8	21,8	21,7	19,3	15,7	11,7	14,6
	1,6	10,8	9,2	8,7	10	12,4	15,1	17,9	20	20,6	19,2	16,8	13,4	14,5
Ивдель	0,4	-1,9	-2,5	-1,9	-0,4	3,3	10	13,7	13,6	9,8	4,3	0,7	-0,9	4
	0,8	-0,8	-1,3	-1,2	-0,5	1,1	6,9	11,1	12,2	9,9	5,6	2,5	0,7	3,8
	1,2	-0,2	-0,7	-0,8	-0,3	0,4	4,7	9,1	10,8	9,8	6,4	3,6	1,5	3,7
	1,6	0,3	-0,2	-0,4	0,1	0,3	3,4	7,8	9,7	9,4	6,7	4,2	2,2	3,6
Игрим	0,8	-21,8	-18,8	-12,5	-2,7	4,1	12	16,3	13,7	7,3	-2	-13,2	-19,6	-3,7
	1,2	-2,1	-1,6	-1,3	-1	1,1	3,6	8,1	10,1	9,7	-7,2	-4,8	-3,8	-4,5
	1,6	-4	-3,5	-3,1	-2,7	-2,5	3	4,5	6	7,1	-7	-6,1	-4,9	-4,7
Иваново	0,8	0,4	-0,1	-0,1	2	6,8	11,5	14,8	14,9	12,1	7,2	3,2	1,4	6,1
	1,6	2,2	1,6	1,3	1,2	4,8	8,7	12	13,2	12,1	8,8	5,3	3,4	6,2
	3,2	5,1	4,2	3,6	3,1	4	6,2	8,6	10,3	10,8	9,9	8	6,3	6,7
Казань	0,8	0,6	-0,2	0	0,8	6,4	11,4	14,3	14,9	12,5	8,2	4	1,5	6,2
	1,2	2,1	1,3	0,8	1,3	5,1	9,3	12,2	13,3	12,3	9,2	5,6	3,1	6,3
	1,6	3,1	2,2	1,6	1,6	4,2	7,8	10,6	12,2	11,9	9,8	6,8	4,3	6,3
Каракалпакская	0,8	1,5	0,9	1,3	5,7	12,1	17	20,3	21,5	19,5	14,6	9	4,7	10,7
АССР	1,2	4,3	3,1	2,8	5,4	9,8	11	17,3	19,1	18,6	15,5	11,3	7,6	10,7
	1,6	6,6	5	4,2	5,2	8,5	11,9	15	17,1	17,5	15,8	12,8	9,5	10,8
Кишинев	0,8	3	2	2,9	8,2	14,2	18,8	21,7	22,5	19,4	14,1	9	4,7	11,7

Файл скачан с www.turbinist.ru

	1,2	4,6	3,4	3,6	7,3	12,4	16,7	19,7	21	19,1	14,9	10,6	6,5	11,6
	1,6	6,2	4,8	4,6	7	11,3	15,1	18	19,6	18,7	15,6	12	8,4	11,8
Краснодар	0,8	5,3	4,5	4,8	8,7	13,8	18,1	21,4	22,6	20,6	16,1	11,6	7,3	12,9
	1,2	6,8	6,6	5,5	8	12,3	16,3	19,5	21,2	20,2	16,9	13	9,1	12,9
	1,6	8,3	6,9	6,4	7,9	11,3	14,8	17,8	19,7	19,6	17,2	14	10,6	12,9
Курск	0,8	1,6	1,2	1	3	8,9	13,5	15,9	16,2	13,7	9,6	5,5	2,8	7,7
	1,2	2,7	2,2	1,7	2,6	7,3	11,5	14,1	14,9	12,3	10,1	6,9	4,2	7,6
	1,6	3,8	2,8	2,5	2,7	6,4	10,1	12,7	13,8	12,9	10,4	8	5,4	7,7
Киев	0,8	1,1	0,1	0,5	4,2	10,9	16,4	19	19	16,1	11,2	6,1	2,5	8,9
	1,2	2,6	1,6	1,3	3,6	9,3	14,1	16,9	17,3	16	12,1	7,7	4,4	8,9
	1,6	3,8	2,8	2,2	3,5	7,9	12,4	13,5	16,2	15,7	12,7	9	5,7	8,9
Ленинград	0,4	-5,5	-6,5	-3,2	1,3	9,5	16,4	20,3	18,1	11,8	6,2	1,2	-2,7	5,6
	0,8	-0,9	-2,3	-1,5	-0,2	3,3	12	17	16,8	12,5	7,8	3,6	0,8	5,7
	1,6	2,3	1,3	0,7	0,7	2	7,7	12,5	14	12,3	9,1	6	3,8	6
Луганск	0,4	-0,7	-1,3	0,4	7,3	15,3	20,2	23,5	23,4	18,9	11,4	5,3	1,4	10,4
	0,8	2	0,8	1,2	5,8	12,2	16,9	20,4	21,2	18,8	13,4	8,3	4,3	10,4
	1,6	4,1	4,4	3,4	4,9	8,6	12,5	15,9	17,6	17,4	14,8	11,2	8	10,3
Минск	0,8	1,2	0,5	0,7	4	10,9	15,4	17,8	17,4	14,1	9,1	4,9	2,1	8,2
	1,2	2,2	1,6	1,4	3,5	9,3	13,5	15,9	16,3	13,9	9,9	6,1	3,5	8,1
	1,6	3,2	2,5	2,2	3,5	8,3	12	14,5	15,2	13,7	10,4	7,2	4,6	8,1
Москва	0,8	1,4	1,1	0,8	1,4	7,8	13,1	16,9	17,6	14,6	9,7	5,1	2,5	7,7
	1,2	2,7	2,2	1,8	1,9	6,4	11,4	15,4	17	15,2	11,1	7	4,1	8
	1,6	3,8	3,7	2,6	2,4	5,6	10,3	14	16,1	15,3	12,1	8,5	5,5	8,3
Московская	0,8	1,7	1,3	1,1	2,2	7,5	11,2	14	14,9	12,7	9	5,1	2,6	6,9
область	1,6	3,6	2,8	2,4	2,3	5,3	8,4	11	12,7	12,4	10,2	7,4	4,9	7
	3,2	5,7	4,7	4	3,5	4,2	6	8	9,8	10,6	10,2	8,9	7,2	6,9
Мурманск	0,8	-2,4	-2,6	-2,3	-1,2	0,6	5,4	10,2	10,8	7,1	3,2	1,2	-1,4	2,4
	1,2	-0,6	-1,1	-1,5	-0,5	0,1	2,8	8,1	9,7	7,2	4,5	1,7	0,5	2,6
	1,6	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	1,3	5,3	7,6	6,8	5,2	2,8	1,4	2,7
Надым-	0,4	-9,3	-9,4	-8,6	-7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Файл скачан с www.turbinist.ru

Уренгой	0,8	-6,6	-8,8	-6,8	-5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,6	-2,5	-4,6	-5,6	-4,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Одесса	0,8	4	2,8	3,2	6,7	11,7	15,4	18,4	19,5	18,3	15	10,7	6,5	11
	1,2	5,4	4	3,9	6,3	10,3	13,7	16,6	17,9	17,3	15,6	11,9	8,2	11
	2,4	9,5	7,8	6,5	6,3	8,2	10,8	13,1	15,1	15,9	15,2	13,6	11,5	11
Орел	0,8	1	0,3	0,2	1,4	7,4	12,6	15,6	16,2	13,7	9,5	5,2	2,1	7,1
	1,2	2	1,4	1	1,4	5,8	10,7	13,8	14,8	13,4	10,2	6,6	3,7	7,1
	1,6	3,6	2,5	1,1	2	4,9	9,1	12,1	13,5	13	10,7	7,7	5,1	7,1
Пенза	0,4	-2,3	-2,7	-1,7	1,4	9,6	15,3	18,4	18,1	13,9	7,5	2,4	-0,7	6,6
	0,8	0,4	0,4	0,4	0,7	7	12,5	15,7	16,4	14	9,4	5	2,1	6,9
	1,6	3,4	2,4	1,9	1,9	4,7	8,8	11,7	13,3	13	10,6	7,5	5,1	7
Пермь	0,4	-0,4	-0,8	-0,6	0,6	6,8	12,6	15,9	15,4	10,6	5,3	1,8	0,1	5,6
	0,8	0,6	0,2	-0,1	0,2	4	9,6	12,9	13,6	10,8	6,7	3,3	1,4	5,3
	1,6	2,4	1,7	1,3	1,1	2,3	6,1	9,1	10,8	10,4	8,2	5,5	3,6	5,2
Ростов на-Дону	0,8	2,4	1,8	2,1	6,3	12,8	17,2	20	20,8	18,2	13,8	9,2	5,3	10,8
	1,2	5,1	3,9	3,6	5,8	10,4	14,4	17,2	18,5	17,6	13,6	11,1	7,6	10,7
	1,6	6,7	5,4	4,7	5,8	9,3	12,8	15,4	17	16,9	13,9	12,2	9,2	10,8
Самарканд	0,8	5,1	5,3	7,9	12,1	17,6	22,4	25,8	26,2	23,5	18,4	12,4	7,6	15,4
	1,2	7,2	6,7	8,1	11,2	15,5	20,1	23,4	24,5	23,1	19,2	14,2	9,8	15,3
	1,6	9	8	8,6	10,8	14,4	18,2	21,2	22,6	22	19,5	15,6	11,7	15,1
Саратов	0,8	0,8	0,1	0	1,6	7,4	12	14,9	15,9	14,1	10,1	5,7	2,5	7,1
	1,2	2,3	1,4	1,1	1,9	6,1	10,1	13	14,4	13,6	10,7	7,3	4,2	7,2
	1,6	3,7	2,7	2,2	2,4	5,3	8,8	11,4	12,9	12,9	11	8,3	5,7	7,3
Свердловск	0,4	-0,8	-1,2	-0,9	1	6,9	12,2	15	14,6	11,2	5,9	1,9	0,1	5,5
	0,8	0,6	0	-0,1	0,7	5,1	9,8	12,9	13,5	11,4	7,3	3,6	1,7	5,5
	1,9	2,4	1,7	1,2	1,2	3,2	6,7	9,7	11,1	10,7	8,5	5,6	3,6	5,5
Сыктывкар	0,4	-0,3	-0,7	-0,7	0	3,4	10,5	13,9	14	10	4,6	1,4	0,3	4,7
	0,8	0,8	0,4	0,2	0,2	2,1	7,8	11,8	12,7	10,3	6,1	3	1,5	4,7
	1,6	2,2	1,6	1,2	0,9	1,4	4,6	8,2	10,2	10	7,5	4,8	3,1	4,6
Сочи	0,8	8,9	8	8,6	11,6	15,3	19	22,2	23,6	22,2	18,7	15,1	11,2	15,4

Файл скачан с www.turbinist.ru

	1,2	10,1	8,8	9	11	14,1	17,4	20,3	22	21,5	19	16	12,4	15,1
	1,6	11,2	9,8	9,6	11	13,4	16,2	18,9	20,8	21	19,2	16,8	13,5	15,1
Ставрополь	0,4	1,2	1,3	2,7	7,7	13,8	17,9	20,3	19,6	15,4	11,4	6	2,8	10
	0,8	3	2,9	2,5	6	11,5	15,4	17,6	17,6	15,3	12,2	7,8	4,6	9,6
	1,6	5	4	3,8	5,3	8,8	12,2	14,4	15,7	15,1	12,7	9,7	6,8	9,5
Тамбов	0,8	0	-1,2	-0,9	1,7	10	15,8	19,1	17,6	13,3	7,6	2,7	0,6	7,2
	1,2	1,2	0,6	0,4	1,3	8,7	13,3	18,8	16,7	13,9	1,5	5,1	2,4	7,5
	1,6	4,2	3,4	2,5	2,3	5,7	9,6	12,3	13,3	12,7	10,5	7,8	5,5	7,5
Ташкент	0,8	4,1	4,5	7,7	13,3	19,3	25	29,3	29,7	26,1	19,6	12,4	7	16,3
	1,2	6,8	6,2	8,2	12,3	17,2	22,3	26,4	27,8	25,6	21,2	15,5	10,4	16,7
	1,6	9,6	8,2	8,9	11,7	15,7	20	23,9	25,7	24,8	21,5	16,9	12,7	16,6
Торжок	0,6	0,9	0,7	0,6	1,8	8,6	12,7	15,2	14,9	11,7	7,4	3,5	1,4	6,6
	1,2	2	1,7	1,4	1,8	6,5	10,5	13	13,7	11,8	8,6	5,2	2,9	6,6
	1,6	2,8	2,3	2	2	5,5	9,2	11,6	12,9	11,7	9,1	6,1	3,8	6,6
Тбилиси	0,8	5,5	5,5	7,4	10,8	14,9	18,6	22,1	23,5	21,9	17,6	13,1	8,6	14,1
	1,2	6,5	7,0	8	10,5	13,6	16,8	20	21,6	21,1	18,2	14,8	10,8	14,1
	1,6	8,5	8,7	9,1	10,7	12,8	15,3	18	19,7	20	19,3	16	12,9	14,2
Уфа	0,4	-1,4	-1,6	-1,2	1,6	1,3	15	17,8	17,6	12,7	7,1	1,9	-1,3	6,5
	0,8	0,8	0,1	0	1	6,9	11,7	14,8	15,9	13,4	9,3	4,2	1,8	6,7
	1,6	3,8	2,8	2,2	2,1	4,4	7,8	10,4	12	12	10,1	7,6	5,2	6,7
Харьков	1	2,7	1,9	1,6	4	9,6	13,2	15,8	16,7	15,2	11,6	7,7	4,6	8,7
	1,5	4,3	3,3	2,7	3,8	7,9	11,3	13,9	15,2	14,7	12,3	9,2	6,4	8,8
	2	5,6	4,5	3,7	4	6,8	9,8	12,2	13,8	13,9	12,5	10,1	7,6	8,7
Хива	0,5	0,4	0,9	5	12,6	20,2	24,4	27,4	27,2	23,4	17	10,3	4,3	14,6
	1	3,7	2,5	4,3	10,3	16,6	21,4	24,7	25	22,7	18,2	12,7	7,1	14
Челябинск	0,4	-2,2	-2,5	-1,6	0,7	5,7	10,4	13,7	14,4	11,5	6,8	2,2	-0,8	4,9
	0,8	-0,1	-0,9	-0,7	0,3	3,8	7,9	11,2	12,6	11,2	7,9	4,3	1,5	4,9
Якутск	0,8	-12,4	-14,1	-12,7	-8,4	-1,4	5	9,4	9,6	5,3	0	-3,4	-8,1	-2,6
	1,2	-8,7	-10,2	-10,2	-6	-3,3	0,1	4,1	5	2,8	0	-0,9	-4,9	-2,8
	1,6	-5,6	-7,4	-7,9	-7	-4,1	-1,8	0,3	1,5	1,1	0,1	-0,1	-2,4	-2,8

Файл скачан с www.turbinist.ru

Примечание. h - глубина заложения трубопровода; $t_{ср}$ - среднегодовая температура.

Таблица 4.14

Температура воздуха (в °С) в различных пунктах СССР

Пункты	Месяцы												$t_{ср}$
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	°С
Актюбинск	-15,6	-14,9	-8,2	4,7	14,6	19,8	22,3	20,3	13,3	4,4	-4,8	-12,1	3,6
Александров Гай	-12,5	-11,9	-5,5	6,9	16	21,4	23,8	21,8	14,8	6,2	-2,1	-8,8	5,8
Алма-Ата	-11,5	-8,9	0,8	10,3	16	20,3	22,9	21,7	15,6	8	-1,2	-8,2	7,2
Архангельск	-12,8	-12,5	-8,6	-0,7	5,4	12	15,2	13,2	7,6	1,1	-4 9	-10,3	0,4
Ашхабад	1,4	4,4	9,4	16,2	23,1	26,2	30,7	29,6	23,5	16,5	8,7	16,7	16,3
Баку	3,8	4	6,2	11	17,7	22,6	25,7	25,6	21,6	16,6	10,9	6,5	14,4
Березово	-22,4	-18,7	-13	-5,1	2,5	10,6	15,9	13	6,7	-2,6	-13,9	-20,4	-4
Бухара	-0,6	2,3	8,5	15,9	22,1	25,8	27,5	25,2	19,3	12,8	6,1	1,8	13,9
Вольск	-12,7	-11,9	-6,4	2	8,8	14,4	17	14,5	8,5	1,7	-4,4	-10,1	1,8
Волгоград	-9,2	-8,7	-2,3	8,3	16,7	21,6	24,2	22,7	16,1	7,8	0	-6,1	-7,6
Вологда	-11,6	-11,1	-6,1	2,4	9,7	14,6	17,2	15	9,2	2,6	-3,6	-9,1	2,4
Воркута	-20,4	-19,8	-17,4	-9,6	-3,2	5,8	11,7	9,5	3,8	-4,4	-13,7	-18,3	-6,3
Воронеж	-9,3	-9,2	-4,1	5,9	14,1	18	19,9	18,7	12,8	5,6	-1,1	-6,7	5,4
Гомель	-6,9	-6,3	-1,8	6,3	13,7	16,9	18,6	17,4	12,5	6,4	0,6	4,3	6,1
Горький	-12	-11,6	-5,6	3,4	11,2	16,3	18,1	16,3	10,7	3,2	-3,6	-8,6	3,4
Грозный	-3,6	-2,3	2,4	9,3	16,5	20,8	23,8	23,2	17,4	11	4	-1,2	10,1
Джамбул	-6,6	-4,6	3,2	11,1	16,4	20,9	23,8	16,6	16,6	9,5	1,1	-3,9	9,2
Ереван	-3,7	-2,3	4	11,1	15,9	20,1	24	24,2	20	13,9	6,2	-1,2	11
Иваново	-11,6	-10,7	-5,3	3,7	11,5	15,9	18,5	16,3	10,1	3,4	-3,2	-9	3,3
Ивдель	-18,6	-16,6,	-9,5	0,8	7,5	13,8	16,2	13,8	7,4	-0,5	-8,9	-16,8	-1
Игрим	-21,8	-18,8	-12,5	-2,7	-4,1	12	16,3	13,7	7,3	-2	-13,2	-19,6	-3,1
Казань	-13,5	-12,9	-7	3,3	12,1	16,9	19	17,1	10,7	3,2	-4,7	-11	2,8
Котлас	-14	-13	-7,4	1,4	8,3	14,3	7,2	14,6	8,4	1,4	-5,5	-11,4	1,2
Киев	-6,1	-5,4	-0,7	7,3	14,6	17,8	19,9	18,8	14,1	7,5	1,0	-3,7	7,1

Файл скачан с www.turbinist.ru

Кишинев	-3,5	-2,5	2,6	9,5	15,9	19,3	21,5	20,7	15,9	10,1	3,9	-0,9	9,4
Краснодар	-1,8	-0,9	4,2	10,9	16,8	20,4	23,2	22,7	17,4	11,6	5,1	0,4	10,8
Кунград	-6,7	-4,7	2	11,3	18,9	23,2	23,3	23,6	17,7	9,8	2,2	-3,6	9,9
Курск	-8,6	-8,4	-3,4	5,8	13,7	17,4	19,3	18,2	12,6	5,6	-0,9	-6,3	5,3
Ленинград	-7,8	-8	-4,6	2,6	9,2	14,4	17,7	16	10,9	4,9	-0,5	-5,1	4,1
Магнитогорск	-16,9	-15,7	-9,1	2,6	11,6	16,6	18,3	16,1	10,2	1,9	-7,1	14	1,2
Медвежье	-28,6	-28,8	-26,8	-17,4	-	-	-	-	-	-	-20,7	-27	-
Москва	-9,4	-8,5	-3,6	4,9	12,9	17	19,3	17,4	11,7	5,0	-1,6	-6,9	4,8
Московская область	-10,6	-10,2	-5,4	3,3	10,9	14,8	17,2	15,3	9,8	3,8	-2,5	-7,9	3,2
Минск	-6,9	-6,4	-2,2	5,3	12,6	16,0	17,8	16,2	11,6	5	0	-4,5	5,4
Мурманск	-12,8	-12,2	-8,4	-2,1	3,3	9,8	13,3	11,1	5,8	-0,8	-6,4	-10,8	-0,8
Навои	0,2	3,2	8,4	15,3	21,7	26	28,2	26,1	19,8	13,2	7,1	2,6	14,3
Надым	-23,6	-22,8	-18,3	-9	-1,5	8,6	14,7	11,4	5,5	-4,5	-17,2	-22,8	-6,6
Новороссийск	-16,4	-15,6	-9,4	3,1	13,3	18,7	20,9	19,1	12,4	3,4	-6	-13	2,5
Новый Порт	-26	-23,6	-21,1	-14,5	-5,9	2,3	10,2	9,8	4,3	-5	-16,9	-22,6	-9,1
Одесса	-3	-2,3	2	8,5	15,3	19,6	22,5	21,5	16,6	10,7	4,5	0,4	9,6
Орел	-9,2	-9,2	-4,4	4,8	12,8	16,8	18,8	17,4	11,6	4,8	-1,4	-6,8	4,6
Пенза	-12,1	-11,6	-5,8	4,5	13,4	17,6	19,8	18,1	11,8	4,3	-3,3	-1,3	3,9
Пермь	-15,1	-13,4	-7,2	2,6	10,2	16	18,1	15,6	9,4	1,6	-6,6	-12,9	1,5
Печора	-18,3	-17,2	-12,7	-2,8	3,4	11,1	14,8	12,4	6,4	-5	-9,9	-16,3	-2,6
Ростов-на-Дону	-5,7	-5,1	0,2	9,3	16,7	20,5	23,6	22,9	16,9	9,3	2,3	-3,5	8,7
Салехард	-24,4	-21,9	-17,9	-10,2	-2,1	7,1	13,8	11,2	6,9	-2,1	-13,2	-19,7	-3,4
Самарканд	-0,3	2,3	7,2	13,7	19,2	23,5	25,5	23,7	18,8	12,5	6,5	2,1	12,9
Саратов	-12,8	-12,2	-6,4	-4,7	14,1	18,6	21,1	19,2	12,3	4,5	-3	-9,2	4,2
Свердловск	-16	-14,4	-8,1	2,3	10	15,5	17,2	14,8	9,2	1,2	-7,2	-13,8	0,8
Ставрополь	-3,7	-3	1,6	8,6	8,6	15,2	19	21,9	21,5	16	10	3,4	9,1
Сыктывкар	-15,1	-13,9	-8	0,9	7,6	14,1	16,6	14	7,8	0,4	-6,9	-13,1	0,4
Сочи	4,9	5,3	7,6	11,1	15,7	19,7	22,5	22,8	19,1	14,8	10,4	7,2	13,4
Талдык	-17,2	-16,1	-3,9	4,5	14,6	20,4	22,8	20,8	13,5	4,1	-4,5	-12,2	3,5

Файл скачан с www.turbinist.ru

Тамбов	-10,8	-10,2	-5,1	5,1	13,9	18	20,2	18,5	12,2	5,3	-2	-7,7	4,8
Тарко-Сале	-25	-23	-18,4	-9	-1,2	9,3	15,4	12,3	5,9	-4,7	-17,7	-23,9	-6,7
Тазово	-26,7	-25,8	-22,5	-14,2	-5,5	5,2	13,4	10,7	4,2	-6,5	-11,4	-24,9	-9,3
Ташкент	-0,9	2	7,6	14,4	20	24,7	26,9	24,9	19,4	12,6	6,4	1,6	13,3
Торжок	-10	-9,6	-5,2	3,2	10,7	14,7	17	15,1	9,8	3,6	-2,3	-7,3	3,3
Тбилиси	0,9	2,6	6,6	11,9	17,3	21,1	24,4	24,2	19,6	13,8	7,6	2,8	12,7
Ухта	-17,3	-15,5	-10,2	-0,7	5,2	12,3	15,3	12,7	6,8	-10	-8,6	-14,9	-1,3
Уфа	-14,1	-13,4	-6,7	4	12,8	17,7	19,3	17,6	11,4	3	-5,5	-11,9	2,8
Харьков	-7,2	-6,7	-1,5	7,6	15,1	18,5	20,5	19,4	13,8	7	0,5	-4,7	6,9
Хива	-4,1	-1	5,4	14,3	21,2	25,7	27,4	25	19	11,5	3,9	-1,7	12,2
Челябинск	-15,5	-14,3	-7,9	3,1	11,9	17,3	18,9	16,8	10,8	2,4	-6,4	-13	2
Якутск	-43,2	-35,8	-22	-7,4	5,6	15,4	18,8	14,8	6,2	-7,8	-27,9	-39,6	-10,2

Среднюю температуру газа на участке определяют по формуле

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{гр}} + \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{гр}}}{al}\left(1 - \text{e}^{-al}\right) - D_i \frac{p_{\text{н}}^2 - p_{\text{к}}^2}{2alp_{\text{ср}}}\left[1 + \frac{1}{al}\left(1 - \text{e}^{-al}\right)\right].$$

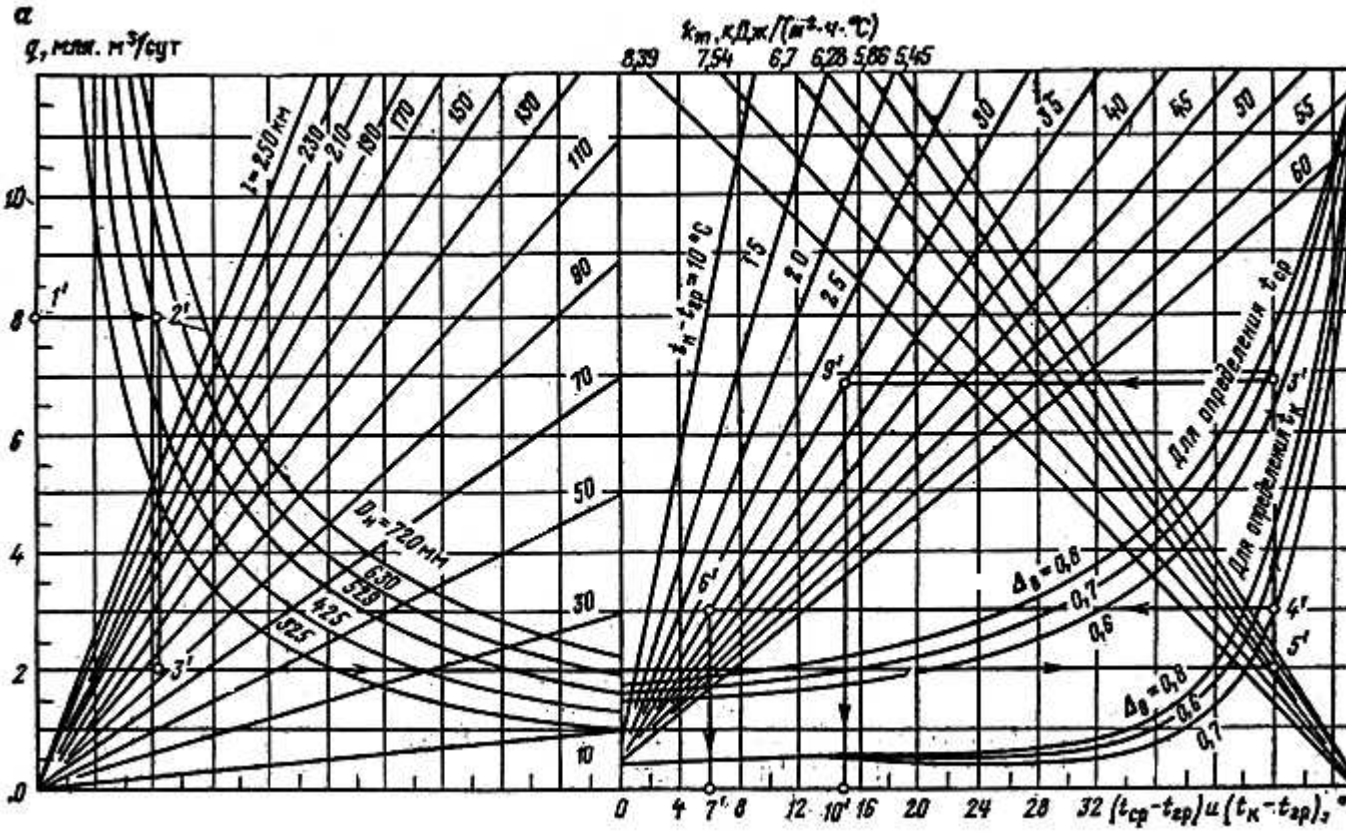
При перепаде давлений в начале и конце рассчитываемого участка менее 1 МПа и его длине более 100 км можно использовать формулу Шухова для расчета температуры газа в любой точке газопровода и средней температуры газа, соответственно

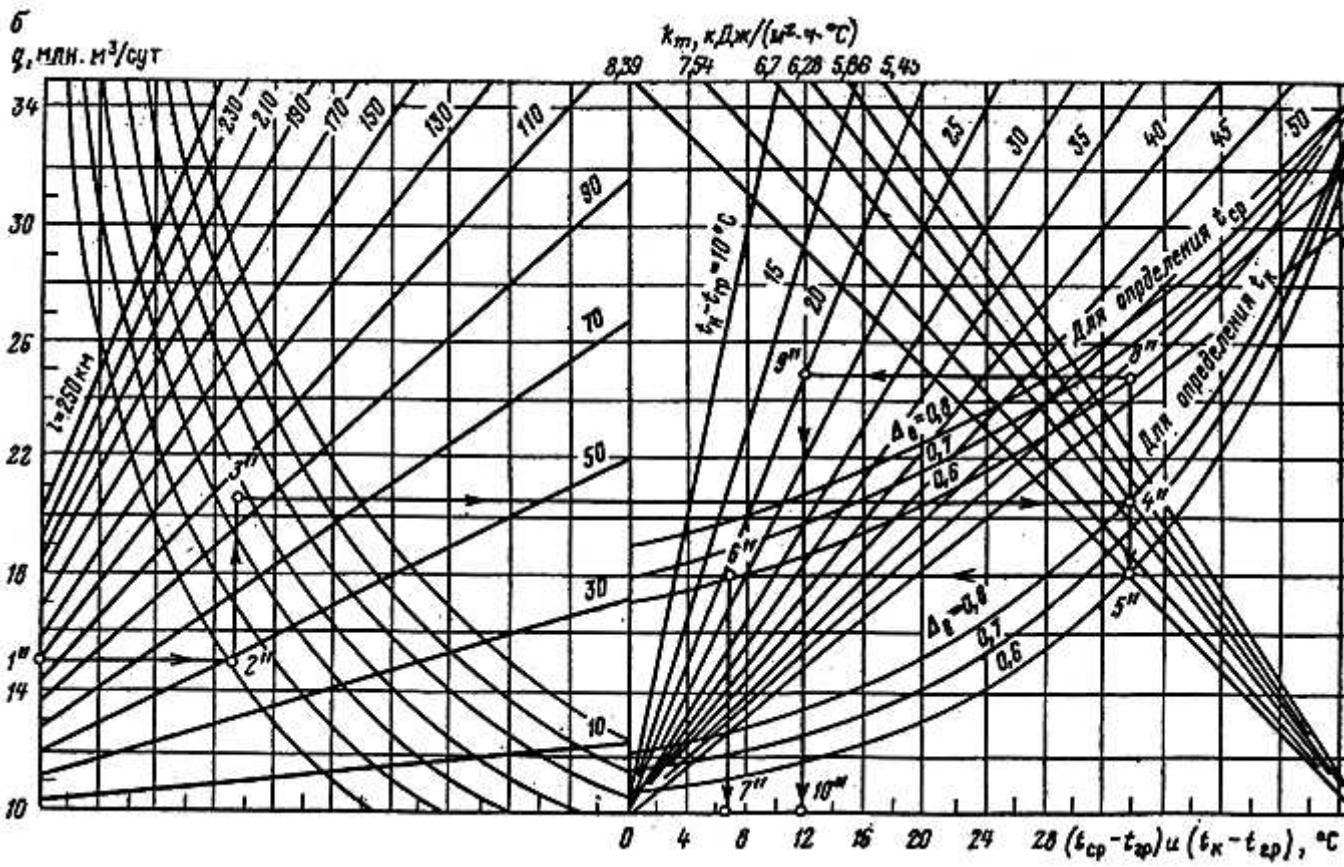
$$t = t_{\text{гр}} + \left(t_{\text{н}} - t_{\text{гр}}\right)\text{e}^{-ax};$$

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{гр}} + \frac{\left(t_{\text{н}} - t_{\text{гр}}\right)}{al}\left(1 - \text{e}^{-al}\right).$$

Приближенное определение конечной и средней температур газа на участке газопровода можно проводить по номограмме (рис. 4.21).

Файл скачан с www.turbinist.ru





Файл скачан с www.turbinist.ru

Рис. 4.21. Номограмма для определения средней и конечной температур газа в газопроводе при c_p = 2520 Дж/(кг·°С) для q = 1 ÷ 12 млн.м^3 /сут (а) и для q =10 ÷ 34 млн.м^3 /сут (б)

Пример 4.13. Дано: q = 8 млн. м^3 /сут, $D_н$ = 529 мм, l = 100 км, Δ = 0,62, $t_н - t_{гр}$ = 30 °С; принято k_m = 6,28 Вт/(м^2 · °С).

Решение

По номограмме на рис. 4.21, $а$ находим $t_{ср} - t_{гр}$ = 15 и $t_к - t_{гр}$ = 6 °С.

Пример. 4,14. Дано: q = 15 млн. м^3 /сут, $D_н$ = 630 мм, l = 100 км, Δ = 0,58, $t_н - t_{гр}$ = 20 °С; принято k_m = 1,75 Вт(м^2 ·°С).

Решение

По номограмме на рис. 4.21, $б$ находим $t_{ср} - t_{гр}$ и $t_к - t_{гр}$.

Определение некоторых параметров, входящих в формулы теплового расчета

Приближенное значение коэффициента теплопередачи от газа к грунту k_m принимается с учетом местных специфических условий прохождения газа по газопроводу.

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи: для грунта, состоящего из сухого песка, k_m = 4,187 кДж/(м^2 ·ч·°С); для очень влажного песка k_m = 12,54 кДж/(м^2 ·ч·°С); для влажной глины k_m = 5,64 кДж(м^2 ·ч·°С).

При отсутствии данных о характере и влажности грунтов по трассе газопровода коэффициент теплопередачи от газа к грунту можно приближенно принимать равным 1,75 Вт/(м^2 ·°С). Однако коэффициент теплопередачи k_m существенно зависит от вида прокладки газопровода (подземная, надземная, прокладка в насыпи), от характера грунта (талый, мерзлый), от степени изоляции (нетеплоизолированный и теплоизолированный).

Коэффициент теплопередачи для нетеплоизолированных газопроводов в талых грунтах:

$$k_m = \frac{\lambda \cdot 10^3}{d_н}\left[0{,}8 + \left(\frac{d_н}{h_{пр} \cdot 10^3}\right)^2\right],$$

где

$$h_{пр} = h_0 + \lambda_т / a_в ,$$

$\lambda_т$ - коэффициент теплопроводности талого грунта (табл. 4.15); h_0 - расстояние от поверхности почвы до оси трубопровода; $a_в$ - коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта

Файл скачан с www.turbinist.ru

в воздух, $a_в = 5{,}3 + 3{,}6 v_в$; $v_в$ - среднемесячная (среднеквартальная, среднесезонная) скорость ветра, определяемая по данным ближайшей метеостанции или климатическим справочникам.

Таблица 4.15

Расчетные значения теплофизических характеристик талых и мерзлых грунтов

Объемная масса, т/м^3	Суммарная влажность грунта	Коэффициент теплопроводности грунта, кДж/(м^2·ч·°С)						Объемная теплоемкость грунта, кДж/(м^2·°С)	
		песок		супесь		суглинки и глина			
1,2	0,05	0,167	0,217	-	-	-	-	1193	1088,6
1,2	0,1	2,6	3,3	1,59	1,88	-	-	1310	1103
1,4	0,05	2,35	2,82	-	-	-	-	1350	1227
1,4	0,1	3,54	4,52	2,12	2,82	1,8	2,78	1510	1286
1,4	0,15	4,19	5,24	2,9	3,6	2,28	3,44	1676	1350
1,4	0,2	-	-	3,52	4,4	2,72	3,94	1880	1445
1,4	0,25	-	-	3,85	4,85	3,02	4,19	2055	1520
1,6	0,05	3,14	3,82	-	-	-	-	1590	1425
1,6	0,1	4,4	5,65	-	-	-	-	1800	1510
1,6	0,15	5,24	6,7	3,9	4,6	3,02	4,1	1970	1550
1,6	0,2	5,7	7,25	4,4	5,4	3,69	4,66	2280	1655
1,6	0,25	5,9	7,63	4,85	6,03	4,02	5,15	2370	1730
1,6	0,3	-	8,1	5,02	6,48	4,19	5,41	2550	1800
1,6	0,35	-	-	5,44	6,9	4,4	5,62	2720	1860
1,6	0,4	-	-	-	7,15	4,6	5,86	2930	1945
1,6	0,6	-	-	-	-	-	6,25	-	2090
1,8	0,1	5,45	6,7	-	-	-	-	2010	1675
1,8	0,15	6,49	7,95	4,99	5,49	3,02	4,1	2220	1760
1,8	0,2	6,9	8,8	5,61	6,37	3,68	5,69	2430	1840
1,8	0,25	7,33	9,35	6,0	7,12	4,02	5,2	2680	1925
1,8	0,3	-	9,72	6,2	7,61	4,19	5,45	2890	2010
1,8	0,35	-	-	6,33	8,09	4,4	5,65	3100	2090

Файл скачан с www.turbinist.ru

1,8	0,4	-	-	-	8,38	4,6	5,9	3320	2180
1,8	0,6	-	-	-	-	-	6,61	-	2340
2,0	0,15	7,37	9,21	5,87	6,29	-	-	2470	1970
2,0	0,2	8,38	10,3	6,52	7,33	5,2	6,29	2720	2050
2,0	0,25	9,47	11,3	7,25	8,07	5,65	6,91	2950	2140
2,0	0,3	-	-	7,55	8,8	6,04	7,33	3220	2220
2,0	0,35	-	-	-	-	6,4	7,79	3430	2320

При наличии снежного покрова

$$h_{\text{пр}} = h_0 + \lambda_{\text{т}}\left(\frac{1}{a_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{сн}}}{\lambda_{\text{сн}}}\right),$$

где $\delta_{\text{сн}}$ - толщина снежного покрова; $\lambda_{\text{сн}}$ - коэффициент теплопроводности снежного покрова.

При приближенных теплотехнических расчетах коэффициент теплопередачи k_m можно определять по номограмме на рис. 4.22, где $\lambda_{\text{гр}}$ - теплопроводность грунта.

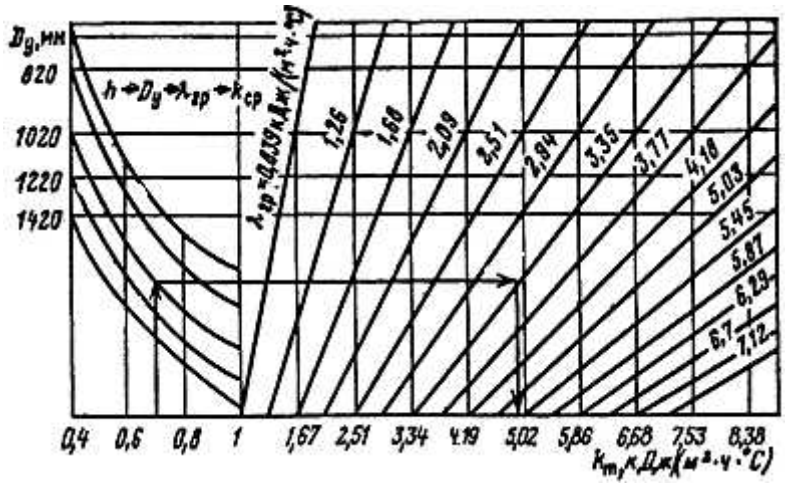


Рис. 4.22. Номограмма для определения коэффициента теплопередачи

Приведенные параметры: давление $p_{\text{пр}} = p_{\text{ср}} / p_{\text{пк}}$, температура $T_{\text{пр}} = T_{\text{ср}} / T_{\text{пк}}$, где $p_{\text{пк}}$ и $T_{\text{пк}}$ - соответственно псевдокритические давление и температура газовой смеси, определяемые по графику на рис. 4.23.

Файл скачан с www.turbinist.ru

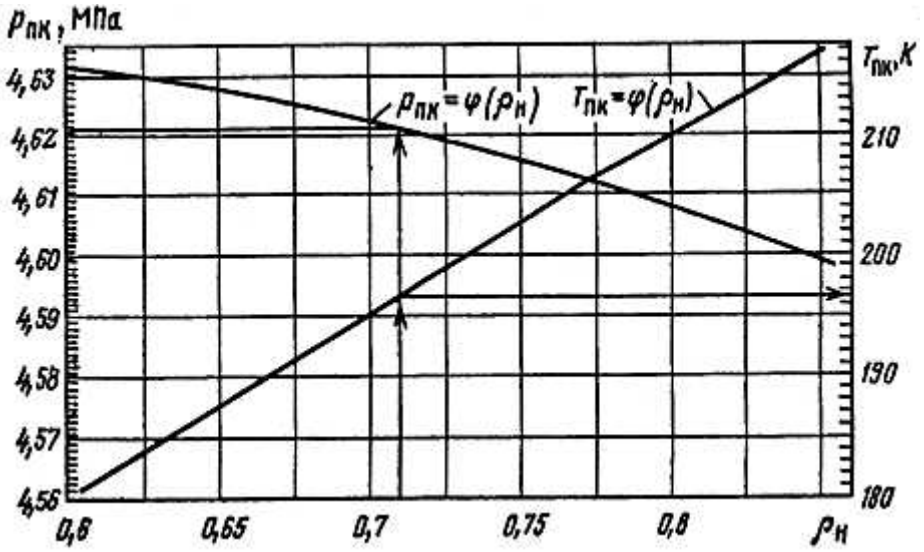


Рис. 4.23. Номограмма для определения псевдокритических параметров газовых смесей в зависимости от их плотности ($\rho_н$ - плотность при 20 °С и 0,1013 МПа)

Коэффициент Джоуля-Томпсона D_i определяют по номограмме, приведенной на рис. 4.24. Для этого проводят линию, параллельную изоэнтальпии, от точки с координатами $p_н$ и $t_н$ до конечного давления $p_к$ и определяют понижение температуры за счет дроссель-эффекта. Разделив ($t_н - t_к$) на ($p_н - p_к$), получаем D_i , т. е.

$$D_i = \frac{t_н - t_к}{p_н - p_к}.$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

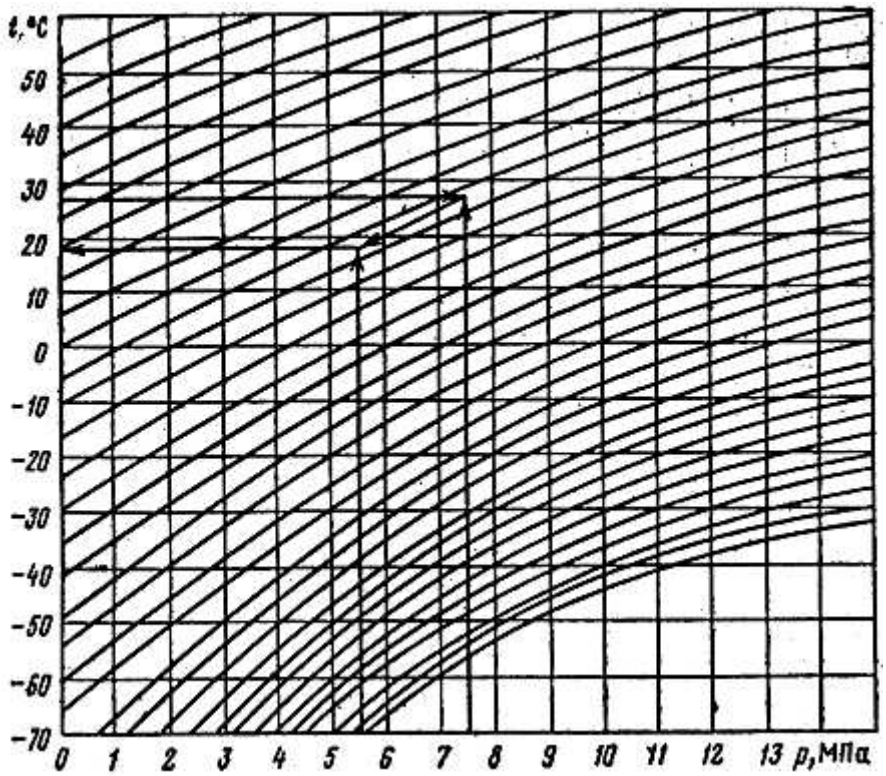


Рис. 4.24. Номограмма для определения интегрального дроссель-эффекта природного газа

Удельную теплоемкость газа при постоянном давлении следует рассчитывать по формуле

$$c_p = c_{pi}{}^0 + \Delta c_p = \sum_{i=1}^{n} c_{pi}^0 r_i + \Delta c_p ,$$

где c_{pi}^0 - теплоемкость i-го компонента газа в идеальном состоянии; Δc_p - поправка к теплоемкости, учитывающая отклонение от идеального газа; r_i - мольная концентрация i-го компонента газа; n - число компонентов в составе газа.

Теплоемкость газов усредненных составов в идеальном состоянии c_p^0 можно принимать по данным графика, изображенного на рис. 4.25. Значения поправки теплоемкости Δc_p в зависимости от приведенных параметров следует определять по графику на рис. 4.26.

Файл скачан с www.turbinist.ru

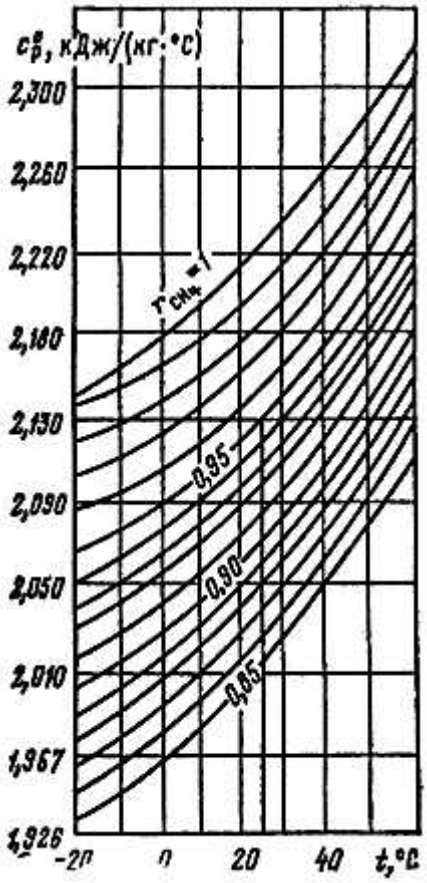


Рис. 4.25. График определения теплоемкости газов усредненных составов в идеальном состоянии

(r_{CH_4} - содержание метана в газе в долях единицы)

Файл скачан с www.turbinist.ru

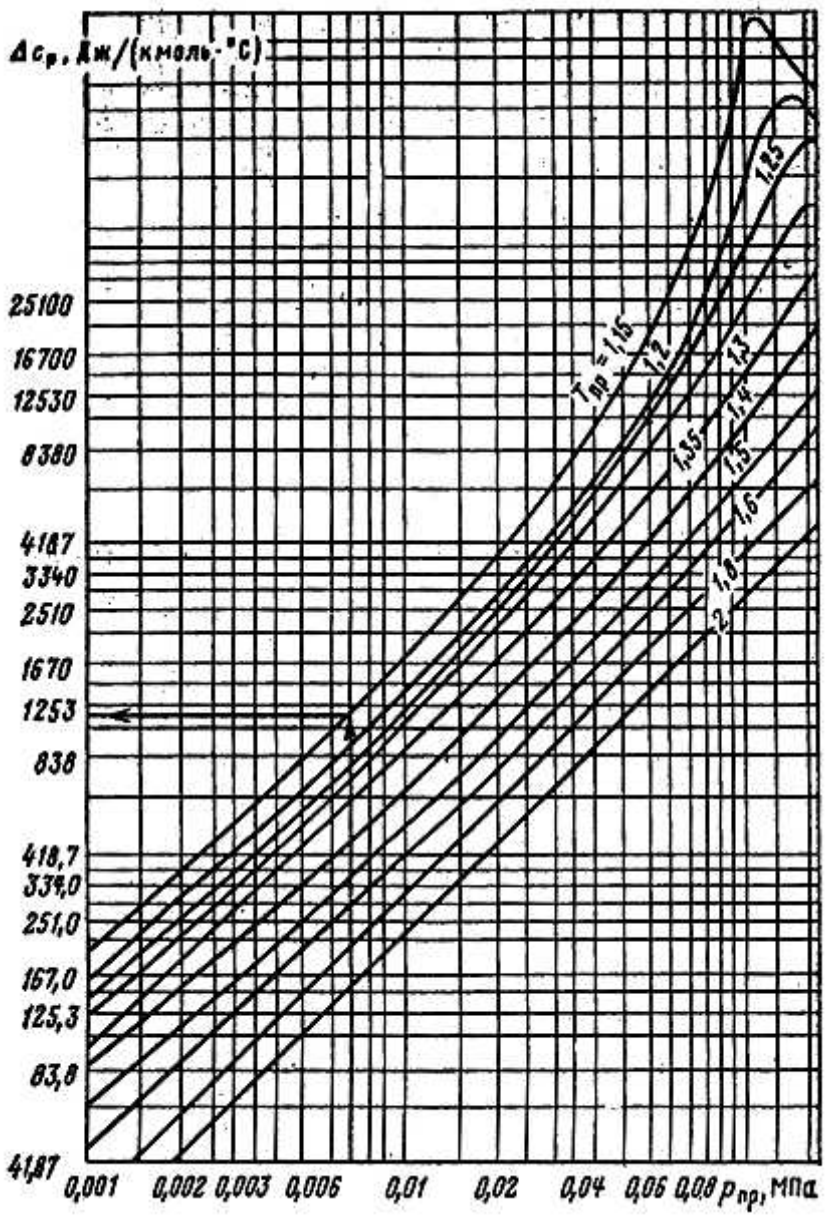


Рис. 4.26. Зависимость поправки теплоемкости Δc_p от приведенных параметров $p_{\text{пр}}$ и $T_{\text{пр}}$

Пример 4.14. Определить температуру газа в конце газопровода при следующих данных: q = 85 млн. м^3/сут, $D_{\text{н}}$ = 1420 мм, $p_{\text{н}}$ = 7,5 МПа, $p_{\text{к}}$ = 5,6 МПа, $p_{\text{ср}}$ = 6,6 МПа, $t_{\text{ср}}$ = 0,9, $c_{\text{р}}$ = 2,52 кДж/(кг·°С), $t_{\text{н}}$ = 27°С, h_0 = 1,51 м, $\lambda_{\text{т}}$ = 3,56 кДж/(м·ч· °С), $V_{\text{в}}$ = 2 м/с, $t_{\text{гр}}$ = 2 °С, l = 100 км, Δ = 0,59, $\rho_{\text{н}}$ = 0,21 кг/см^3.

Решение

1. Определяем вспомогательные величины:

$$a_{\text{в}} = (5{,}3 + 3{,}6 - 2)\cdot 4{,}127 = 52{,}4 \text{ кДж/(м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{°С)};$$

$$h_{\text{пр}} = 1{,}51 + 3{,}56/52{,}4 = 1{,}58 \text{ м};$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$k_m = \frac{3{,}56 \cdot 10^3}{1420}\left[\left(0{,}8 + \frac{1420}{1{,}58 \cdot 10^3}\right)\right] = 4{,}01 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$ax = \frac{62{,}6 \cdot 4{,}01 \cdot 1420 \cdot 100}{85 \cdot 0{,}59 \cdot 2{,}52 \cdot 10^3} = 0{,}28;$$

по табл. 4.12

$$e^{-0{,}28} = 0{,}7558.$$

2. Определяем средние температуру и давление:

$$t_{ср} = 2 + \frac{25}{0{,}28}(1 - e^{0{,}28}) = 23{,}4 \text{ °C};$$

$$p_{ср} = \frac{2}{3}\left(7{,}5 + \frac{5{,}6^2}{7{,}5 + 5{,}6}\right) = 6{,}6 \text{ МПа}.$$

По номограмме на рис. 4.23 определяем

$$p_{пк} = 4{,}1 \text{ МПа}; \quad T_{пк} = 196{,}5 \text{ К}.$$

3. Определяем приведенные параметры:

$$p_{пр} = p_{ср} / p_{пк} = 66/47{,}11 = 1{,}4;$$

$$T_{пр} = T_{ср} / T_{пк} = 296{,}4/196{,}5 = 1{,}51.$$

4. Находим коэффициент Джоуля-Томпсона

$$D_i = \frac{(27 - 20) \cdot 0{,}098}{7{,}5 - 5{,}6} = 0{,}37 \text{ °C/МПа}.$$

5. Определяем температуру газа в конце газопровода

$$t = 2 + (27 - 2)e^{-0{,}28} - \frac{0{,}37(7{,}5^2 - 5{,}6^2)(1 - e^{-0{,}28})}{2 \cdot 100 \cdot 0{,}28 \cdot 6{,}6} = 14{,}8 \text{ °C}.$$

4.8. ПРОДУВКА И ОЧИСТКА ПОЛОСТИ ГАЗОПРОВОДА

Для устранения из газопровода грунта, воды и посторонних предметов, накопившихся за период строительства, ремонта или из-за некачественной промысловой подготовки газа, осуществляют его продувку. Наиболее эффективной является продувка газопровода с пропуском очистных устройств.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Подземные, полуподземные и наземные газопроводы следует продувать при скорости перемещения очистных устройств до 100 км/ч. Продувку надземных газопроводов необходимо осуществлять пропуская очистные устройства облегченной конструкции со скоростью не более 10 км/ч.

Конструктивные схемы очистных устройств

Для продувки участков газопроводов, заполненных большим количеством твердых загрязнений, а также водой в объеме, не превышающем 10 % объема полости, используют следующие устройства:

поршень (рис. 4.27, а) для трубопроводов диаметром 300-1400 мм с кривыми вставками радиусом не менее 5D; поршень (рис. 4.27, б) для трубопроводов диаметром 300-1400 мм с кривыми радиусом не менее 3D, в том числе сваренными из отдельных сегментов; поршень (рис. 4.27, в) для трубопроводов диаметром 100-250 мм с кривыми радиусом не менее 5D; поршень (рис. 4.27, г) для трубопроводов диаметром 100-250 мм с кривыми радиусом не менее 3D, в том числе сваренными из отдельных сегментов.

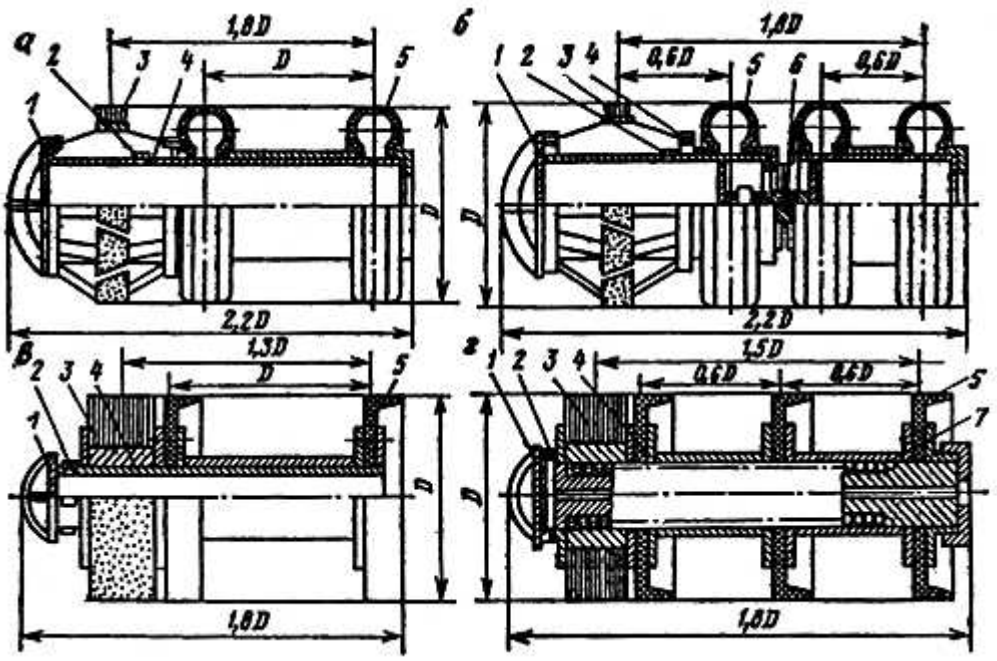


Рис. 4.27. Схемы поршней (а, б, в, г) для очистки полости трубопровода от загрязнений и воды:

1 - защитный диск; 2 - устройство для перетока гаэа; 3 - щетка; 4 - корпус;
5 - уплотнительные манжеты; 6 - шарнир; 7 - пружина

Для удаления сухих загрязнений, а также для повторных продувок магистрали при повышенных требованиях к чистоте полости трубопровода используют следующие устройства:

поршень (рис. 4.28, а) для трубопроводов диаметром 600-1400 мм с кривыми радиусом не менее 5D; поршень (рис. 4.28, б) для трубопроводов диаметром 300-500 мм с кривыми радиусом не менее 5D; поршень (рис. 4.28, в) для трубопроводов диаметром 300-1400 мм с кривыми радиусом не менее 3D, в том числе выполненными из отдельных сегментов.

Файл скачан с www.turbinist.ru

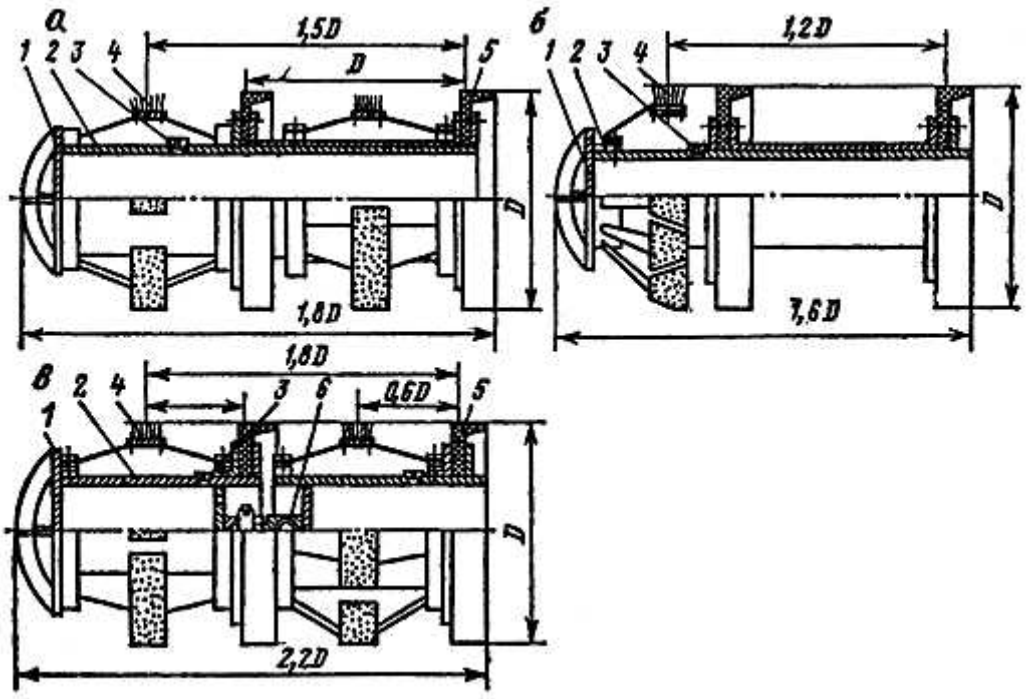


Рис. 4.28. Схемы поршней (а, б, в) для очистки полости трубопровода от сухих загрязнений:

1 - защитный диск; 2 - корпус; 3 - устройство для перетока газа; 4 - щетка; 5 - уплотнительные манжеты; 6 - шарнир

Для продувки участков трубопровода, заполненных водой в объеме не менее 10-15 % (от объема полости), а также для повторных продувок при повышенных требованиях к влажности внутренней поверхности магистрали используют следующие устройства:

поршни типа ОПР-М (рис. 4.29, а) для трубопроводов диаметром 300-1400 мм с кривыми радиусом не менее 5D; поршни (рис. 4.29, б) для трубопроводов диаметром 600-1400 мм с кривыми радиусом не менее 5D; поршни (рис. 4.29, в) для трубопроводов диаметром 100-500 мм с кривыми радиусом не менее 3D, в том числе сваренными из отдельных сегментов; поршни типа ДЗК-РЭМ (рис. 4.29, г) для трубопроводов диаметром 100-1400 мм с кривыми радиусом не менее 3D, в том числе сваренными из отдельных сегментов.

Файл скачан с www.turbinist.ru

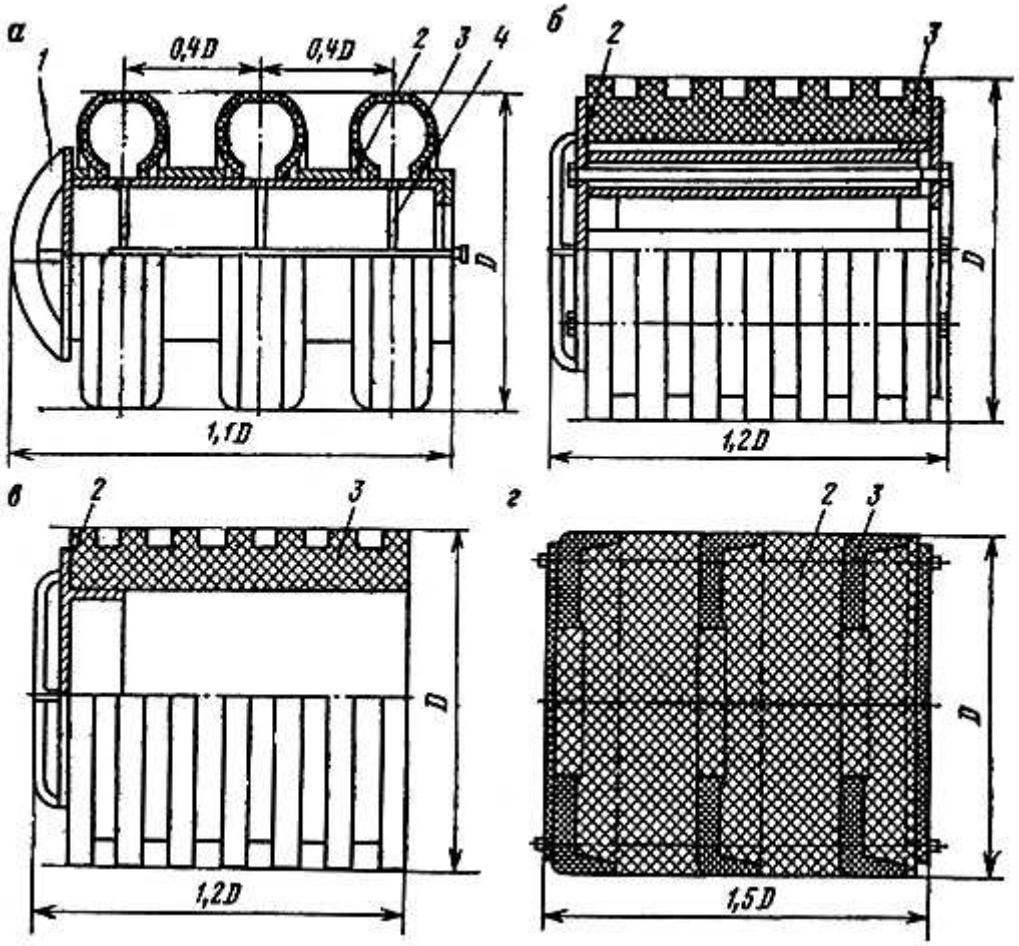


Рис. 4.29. Схемы поршней (а, б, в, г) для удаления воды и пульпы (загрязнений в смеси с водой):

1 - защитный диск; 2 - корпус; 3 - уплотнительные манжеты; 4 - воздушная система надувных уплотнительных манжет

Техническая характеристика разделителя

Тип	ОПР-М-1200; ДЗК-РЭМ-1200; ДЗК-РЭМ-1400
Рабочая среда, под воздействием которой разделитель перемещается по газопроводу	Воздух, природный газ
Минимальный перепад давления, необходимый для страгивания с места разделителя в сухом газопроводе, МПа	0,05-0,06
Оптимальная скорость движения разделителя по трубопроводу, км/ч	1-10
Гарантийный пробег разделителя при одноразовой запасовке в трубопроводах, км	Не менее 250
Усилие запасовки разделителя в трубопровод, кг	Не более 4500

Файл скачан с www.turbinist.ru

Размеры, мм:	
диаметр	1260
длина	1600
Масса, кг	490

Конструктивная характеристика авиационных покрышек

Обозначение	1260Х390
Наружный диаметр, мм	1246±14
Посадочный диаметр, мм	588
Ширина, мм	386±8
Рисунок протектора	Зиг-заг
Масса, кг	58

Техническая характеристика разделителей ДЗК-РЭМ

Диаметр трубопровода, мм	1200-1400	
Рабочая среда, под воздействием которой разделитель перемещается по газопроводу	Воздух, природный газ	
Минимальный перепад давлений, необходимый для страгивания с места разделителя в сухом газопроводе, МПа	0,02-0,03	
Оптимальная скорость движения разделителя по газопроводу, км/ч	1-10	
Гарантийный пробег (срок службы) разделителя при одноразовой запасовке в трубопровод, км	150	150
Размеры, мм:		
диаметр	1260	1450
длина	1800	2100
Масса, кг	150	300

Поршень очистной РМ-ПС 1000/1200 предназначен для очистки полости газопроводов от жидкостей (вода, конденсат). Поршень оснащен пятью секциями резиновых манжет. Техническая характеристика: скорость движения - до 36 км/ч; перепад давления на поршне минимальный - 0,05 МПа; максимальный - 0,5 МПа.

Поршни очистные ПО-2 и ПО-5 предназначены для очистки полости газопроводов диаметром 1220 мм от загрязнений, воды, конденсата и отложений. Поршень оснащен полиуретановьми манжетами и чистящими щеткам. Техническая характеристика: скорость движения - до 30 км/ч; давление среды - до 7,5 МПа; перепад давления газа на поршне - 0,05-0,06 МПа.

Файл скачан с www.turbinist.ru

ГЛАВА 5
КОМПРЕССОРНЫЕ СТАНЦИИ

Компрессорные станции (КС) предназначены для повышения давления и перекачки газа по магистральному газопроводу. Они служат управляющим элементом в комплексе сооружений, входящих в магистральный газопровод. Практически именно параметрами работы КС определяется режим работы газопровода. Наличие КС позволяет регулировать режим работы газопровода при колебаниях потребления газа, максимально использовать аккумулирующую способность газопровода.

В газовой промышленности в качестве газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на магистральных газопроводах применяют центробежные нагнетатели с приводом от газовой турбины или электродвигателя. Поршневые газомотокомпрессоры используют на станциях подземного хранения газа.

5.1. ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫЕ И ГАЗОТУРБИННЫЕ КС

Электроприводные станции отличаются от газотурбинных типом привода. Для электроприводных КС обязательно наличие редуктора (мультипликатора) между электроприводом и нагнетателем.

Технологическая схема КС с универсальной обвязкой изображена на рис. 5.1, с коллекторной - на рис. 5.2.

Техническая характеристика газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с газотурбинным приводом приведена в табл. 5.1, с электроприводом - в табл. 5.2.

Электродвигатели АЗ-4500-1500, СТМ-4000-2, СТД-4000-2, СДСЗ-4500-1500 предназначены для привода центробежных нагнетателей типа "280" через повышающий редуктор. Такие нагнетатели могут работать с роторами диаметром 564, 590, 600 и 620 мм различных модификаций в зависимости от подачи и степени сжатия КС.

Таблица 5.1

Техническая характеристика ГПА с газотурбинным приводом

Наименование показателя	ГТ-700-5	ГТК-5	ГТ-750-6	ГТ-6-750	ГТН-6	ГПА-Ц-6,3	ГТК-10-2	ГТК-10-4
Завод-изготовитель (фирма)	НЗЛ	НЗЛ	НЗЛ	УТМЗ	УТМЗ	ПО имени Фрунзе	НЗЛ	НЗЛ
Год выпуска	1961	1965	1965	1965	1976	1975	1969	1973
Тип нагнетателя	280-12-4	370-15-2	370-14-1/ 370-17-1	Н-300-1,23	Н-300-1,23		520-12-1	370-18,1
Номинальная подача, млн. $м^3$ /сут	13	13	19,5/19,8	19	19	10,7	29,3	37
Станционные условия:								
Температура	15	15	15	15	15	15	15	15

Файл скачан с www.turbinist.ru

наружного воздуха t_{a0}, °С								
Атмосферное давление p_{ao}, МПа	0,1013	0,1013	0,1013	0,0979	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013
Сопротивление входного тракта, кПа	0,506	0,506	0,506	1,22	1,22	1,01	0,506	0,506
Сопротивление выходного тракта, кПа	-	-	-	-	-	1,01	0,506	1,01
Номинальная мощность, N_{e0}, тыс. кВт	4,25	4,4	6	6	6,3	6,3	10	10
Эффективный к. п. д. ГТУ η_{e0}, %	25	26	27	24	24	22,5	28	29
К. п. д. ГТУ в условиях ИСО, %	-	-	-	-	-	-	-	-
Номинальный расход топлива $G_{т.г0}$, $м^3$/ч	1770	1760	2320	2600	2730	2920	3720	3600
Удельный расход топлива $G_{т.г0} / N_{e0}$, $м^3$/кВт·ч	0,416	0,4	0,386	0,434	0,434	0,463	0,372	0,36
Температура газа перед ТВД, $t_{вхТВД_0}$. °С	700	700	750	760	760	710	780	780
Температура газа за силовой турбиной, $t_{выхТНД_0}$, °С	475	475	476	415	415	410	495	495
Степень сжатия осевого компрессора $\varepsilon_к$	3,9	3,9	4,6	6,0	6,0	7,8	4,4	4,4
Расход воздуха через компрессор $G_{вх\ к0}$, кг/с	45,2	45,2	58,2	45,5	45,5	56	86,2	86,2
Температура за компрессором $t_{вых\ к0}$, °С	170	170	195	235	235	296	190	190
Степень регенерации μ	0,67	0,67	0,66	0	0	0	0,7	0,7

Файл скачан с www.turbinist.ru

Частота вращения турбокомпрессора $n_{\text{ТВД0}}$, об/мин	5000	5000	5200	6200	6200	8200	5200	5200
Частота вращения силового вала $n_{\text{ТНД0}}$, об/мин	5500	5500	5300	6150	6150	8200	4800	4800
Температурный коэффициент при расчете располагаемой мощности K_t	4,4	4,4	3,7	3,7	3,7	1,3	3,7	3,7

Продолжение табл. 5.1

Наименование показателя	ГПА-10	ГТК-16	ГПА-Ц-16	ГТН-25	ГТК-25	ГТН-10И	Коберра-182	ГТН-25И
Завод-изготовитель (фирма)	ПО "Заря"	УТМЗ	ПО имени Фрунзе	УТМЗ	НЗЛ	"Дженерал Электрик"	"Купер-Бессемер" (Роллс-Ройс)	"Дженерал Электрик"
Год выпуска	1979	1975	1982	1983	1981	1975	1972	1968
Тип нагнетателя	370-18,1	Н-800-1,25 ---------- Н-16-16	Н-16/76	650-21-2 ------- Н-25 76	Н-25-76	Купер-Бессемер, Нуово-Пиньоне PCL-802/24	2ВВ-30	Нуово-Пнньоне PCL-1002/40
Номинальная подача, млн. м^3/сут	37	51	51	53	53	16,5; 17,2	21,8	45
Станционные условия: Температура наружного воздуха t_{a0}, °С	25	15	15	15	25	15	15	15
Атмосферное давление p_{a0}, МПа	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013	0,0979	0,1013
Сопротивление входного тракта, кПа	4,05	1,22	2,03	0,506	1,01	1,37	0,608	1,37
Сопротивление выходного тракта, кПа	3,04	-	582	0,71	1,52	0,76	0,506	0,76

Файл скачан с www.turbinist.ru

Номинальная мощность N_{e0}, тыс. кВт	10	16	16	25	25	10,3	12,9	25
Эффективный к. п. д. ГТУ η_{e0}, %	26,5	25	27	31	28	25,7	27,3	27,5
К. п. д. ГТУ в условиях ИСО, %	-	-	28,8	-	29	26,4	28,1	28,8
Номинальный расход топлива $G_{т.г0}$, $м^3$/ч	3930	6670	6180	8400	9680	4180	4890	9450
Удельный расход топлива $G_{т.г0}$ / N_{e0}, $м^3$/кВт·ч	0,393	0,416	0,386	0,336	0,372	0,405	0,379	0,379
Температура газа перед ТВД, $t_{вхТВД0}$, °С	785	810	794	1020	890	925	887	925
Температура газа за силовой турбиной, $t_{вых\ ТНД0}$, °С	385	412	380	467	385	540	411	500
Степень сжатия осевого компрессора $\varepsilon_к$	10,3	7,5	9,7	13	12,5	7,1	9	8,2
Расход воздуха через компрессор $G_{вх\ к0}$, кг/с	80,2	100	102	103	175	51	76	118,5
Температура за компрессором $t_{вых\ к0}$, °С	332	276	285	386	372	261	328	285
Степень регенерации μ	0	0	0	0	0	0	0	0
Частота вращения турбокомпрессора $n_{ТВД0}$, об/мин	5620 ------- 7660 *	4900	5244 ------ 6874 *	7100	4340 ------- 5050 *	7100	7500	5100
Частота вращения силового вала $n_{ТВД0}$, об/мин	4800	4600	5300	5500	3700	6500	5000	4670
Температурный	3,7	3,2	2,8	3,2	3,4	2	2	2,2

Файл скачан с www.turbinist.ru

коэффициент при расчете располагаемой мощности K_t								

Примечания. 1. НЗЛ - Невский завод им. В. И. Ленина; УТМЗ - Уральский турбомеханический завод;. ПО - производственное объединение. 2. Звездочкой обозначена частота вращения промежуточного вала. 3. НСО - номинальные условия по международному стандарту ИСО 2314, которые определяют единые параметры сравнения двигателей: +15 °С и 0,10ГЗ МПа на срезе входного патрубка осевого компрессора и 0,1013 на срезе выходного патрубка турбины (регенератора), т.е. без учета гидравлических сопротивлений на входе и выходе ГТУ.

Таблица 5.2

Техническая характеристика ГПА с электроприводом

Тип агрегата	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток статора А	Частота вращения, об/мин	Коэффициент мощности	К.п.д. электродвигателя, %	Тип возбудительного устройства	Мощность возбудительного устройства, кВт	Напряжение возбуждения, В	Ток возбуждения, А	Тип воздухоохладителя	Количество циркулирующей воды для охлаждения воздуха при 30°С, $м^3/ч$
АЗ-4500-1500	4500	6000	520	1490	0,87	95,6	-	-	-	-	-	-
СДСЗ-4500-1500	4500	6000	500	1500	0,9	96,5	ТВУ-65-320 ---------- ПВ-91	29 ---- 29	65 ----- 84	320 ---- 328	-	-
СТМ-4000-2	4000	6000	445	3000	0,9	97,5	ПВ-92	39	122	320	ВУП	54
СТД-4000-2	4000	6000 ------- 10000	438 ----- 265	3000	0,9	97,5 ----- 97,4	ПВ-92 ---------- БВУ-2Ф	39 ----- 40	101 --- 103	289 ---- 294	ВБ-70	56
СТМП-4000-2	4000	6000	445	3000	0,9	96,7	ПВ-91	29	84	328	ВУП-22	54
СТД-12500-2	12500	6000 ------- 10000	1368 ----- 820	3000	0,9	97,9 ----- 97,8	ВТ-75	75	226 ---- 220	290 ---- 282	ВБ-1405	74

Продолжение табл. 5.2

Тип ГПА	Расход	Масса	Тип центро-	Диаметр	Степень	Абсолютно	Подача (при	Частота вра-	Высота	Масса, т		Удельная
										нагнета-	общая	

Файл скачан с www.turbinist.ru

	воздуха воздухо-охладителем, $м^3/с$	электродвигателя и воздухоохладителя, т	бежного нагнетателя	колеса, мм	сжатия	е давление нагнетателя, МПа	20°С и 0,1013 МПа), млн. $м^3$/сут	щения вала нагнетателя, об/мин	площадки и обслуживания, м	теля со вспомогательным оборудованием и редуктором	агрегата	металлоемкость агрегата, кг/кВт
АЗ-4500-1500	-	28,8	280-11-1	600	1,25	5,6	13	7980	4,2	24,2	51	11,3
СДСЗ-4500-1500	-	26,8	280-11-1	600	1,25	5,6	13	7980	4,2	24,2	51	11,3
СТМ-4000-2	4	20	280-11-6	600	1,25	5,6	13	7980	4,2	24,2	44,2	11
СТД-4000-2	3,2	12,9	280-11-6 --------- 280-11-7	600	1,25	5,6	13	7980	4,2 ---- 0	24,2 ----- 25	37,1 --- 37,9	9,3 ---- 9,5
СТМП-4000-2	4	20,6	280-11-7	600	1,25	5,6	13	7980	0	25	45,6	11,4
СТД-12500-2	8,5	25,5	370-18-2	845	1,23	7,6	37	4800	4	52,4	77,9	6,2

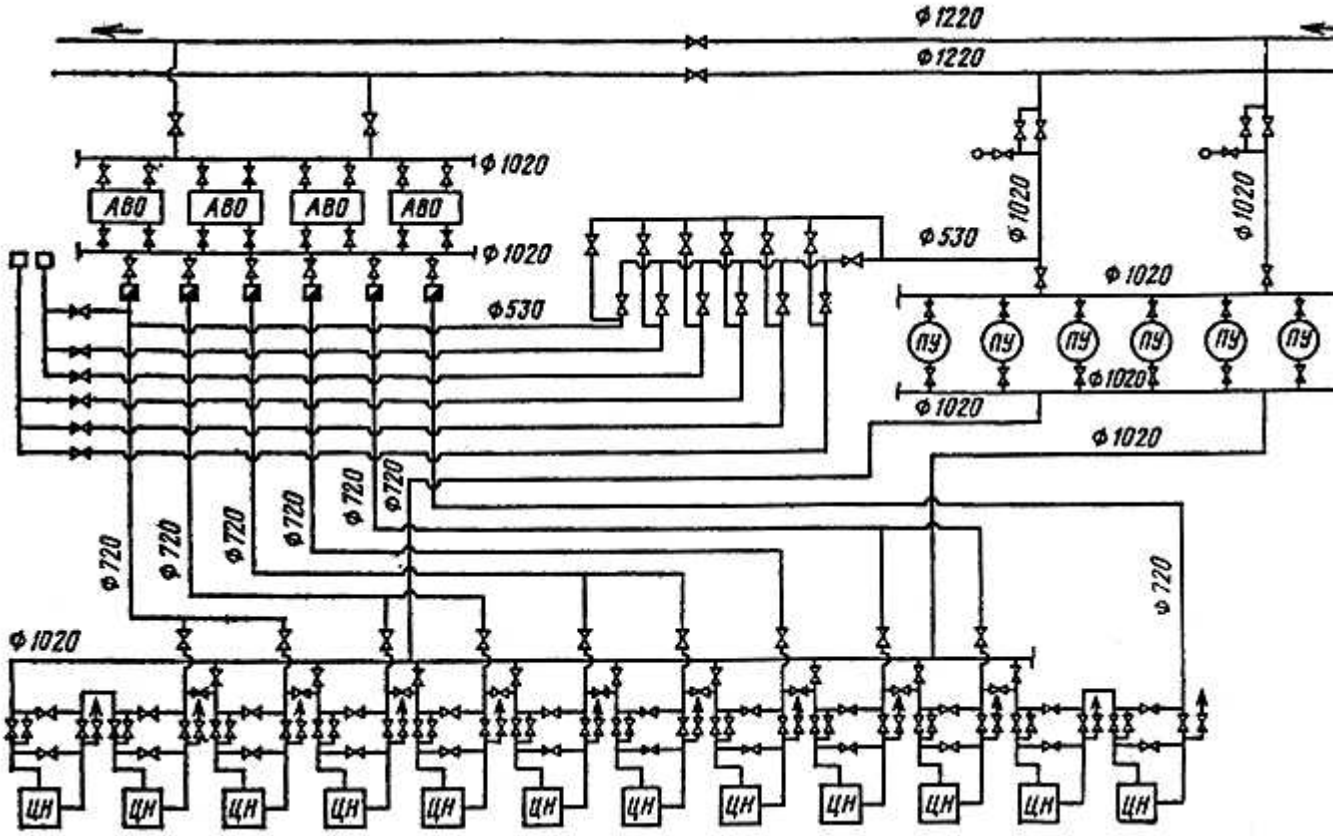


Рис. 5.1. Технологическая схема КС с универсальной обвязкой:

Файл скачан с www.turbinist.ru

$АВО$ - аппарат воздушного охлаждения; $ПУ$ - пылеуловитель; $ЦН$ - центробежный нагнетатель

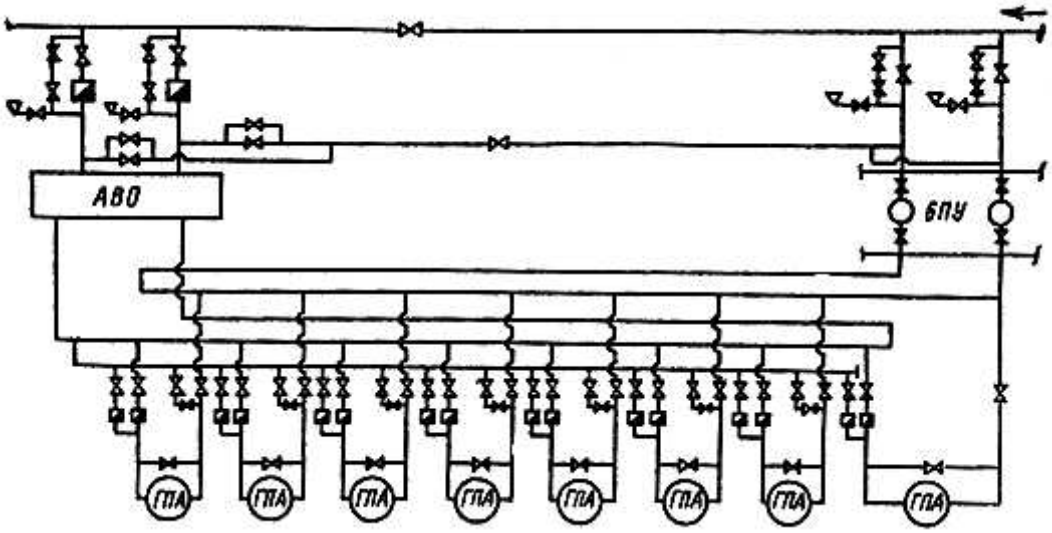


Рис.5.2. Технологическая схема КС с коллекторной обвязкой двухступенчатых (полнонапорных) нагнетателей:

$АВО$ - аппараты воздушного охлаждения; $ПУ$ - пылеуловитель; $ГПА$ - газоперекачивающий агрегат

5.2. РАСЧЕТ РЕЖИМА РАБОТЫ КС С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

Расчет режима работы КС с использованием приведенных характеристик нагнетателей основан на методике, изложенной в ОНТП-51-1-85. Сам метод расчета является академическим и используется как для расчетов при проектировании газопроводов, так и в существующих программах по расчету фактически работающих газотранспортных систем. К сожалению, из-за разброса по техническому состоянию ГПА в пределах цеха невозможно определить подачу каждой группы нагнетателей. Таким образом метод может быть использован для расчета КС только при одинаковом техническом состоянии как приводов, так и нагнетателей. Он сводится к определению режима работы центробежных нагнетателей: приведенной объемной подачи $[Q_{об}]_{пр}$, приведенной частоты вращения ротора $[n/n_{н}]_{пр}$, мощности на валу привода N , степени сжатия ε, политропического к. п. д. $\eta_{пол}$. На рис. 5.3-5.16 изображены приведенные характеристики основных центробежных нагнетателей.

Файл скачан с www.turbinist.ru

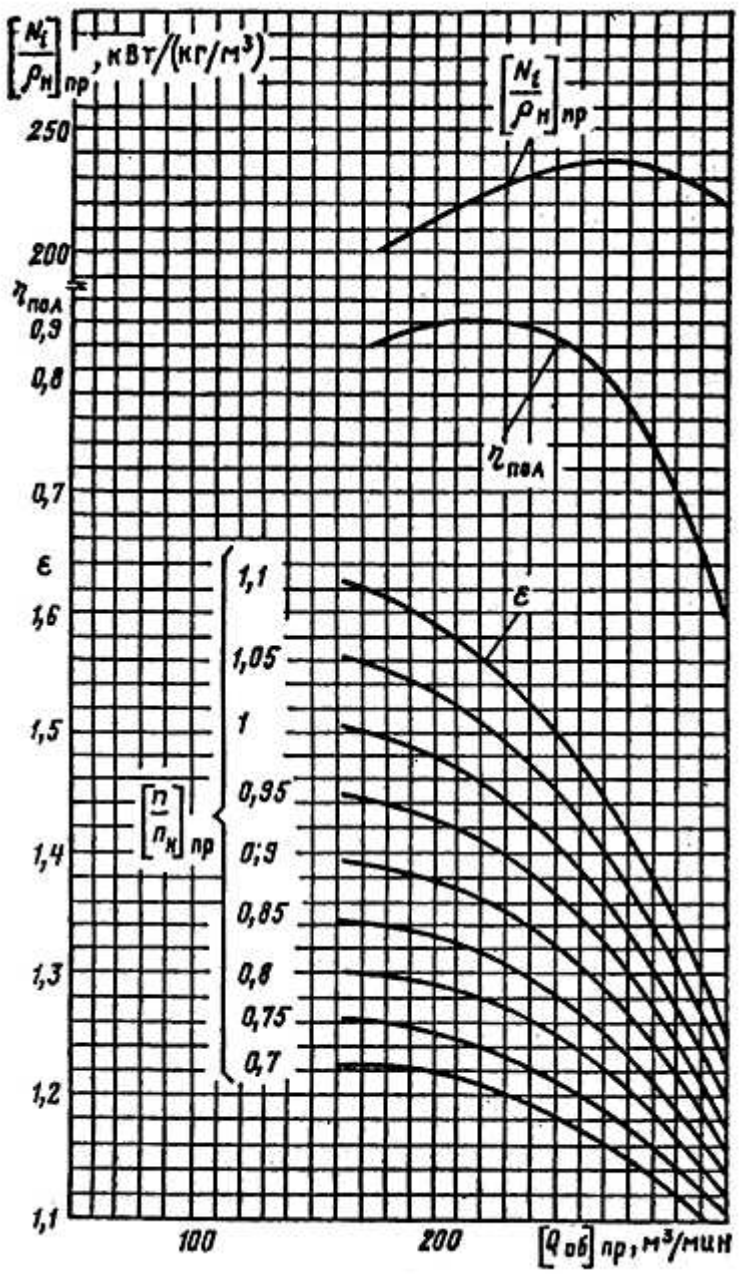


Рис. 5.3. Приведенные характеристики нагнетателя 235-21-1 при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$;

$z_{\text{пр}} = 0{,}888$; $R_{\text{пр}} = 503{,}16$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

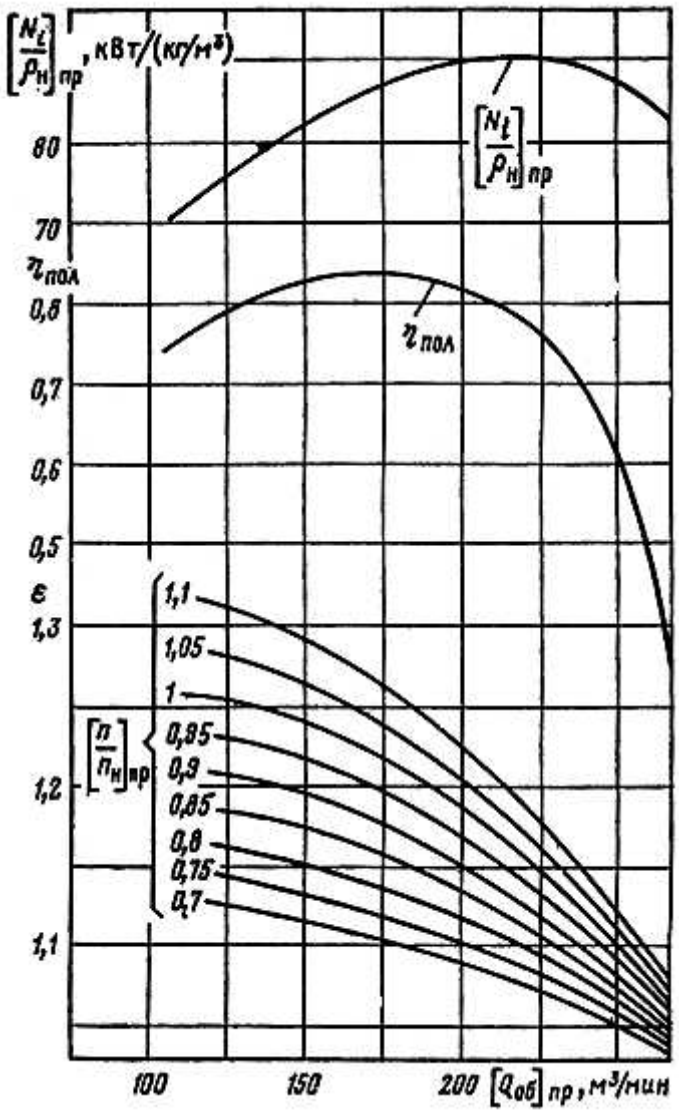


Рис. 5.4. Приведенные характеристики нагнетателя 280 с рабочим колесом диаметром 564 мм (гиперболический покрывающий диск, число лопаток 10) при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$; $z_{\text{пр}} = 0{,}91$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

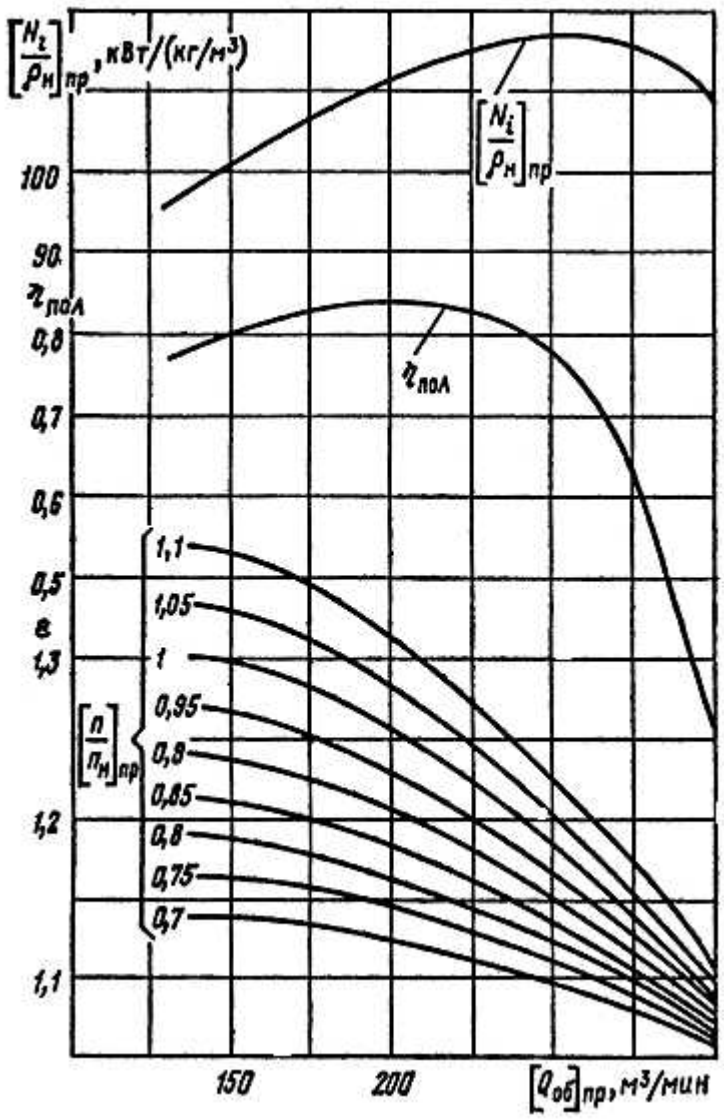


Рис. 5.5. Приведенные характеристики нагнетателя 280 с рабочим колесом диаметром 590 мм (гиперболический покрывающий диск, число лопаток 14) при $[T_н]_{пр} = 288\,К$; $z_{пр} = 0{,}91$; $R_{пр} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

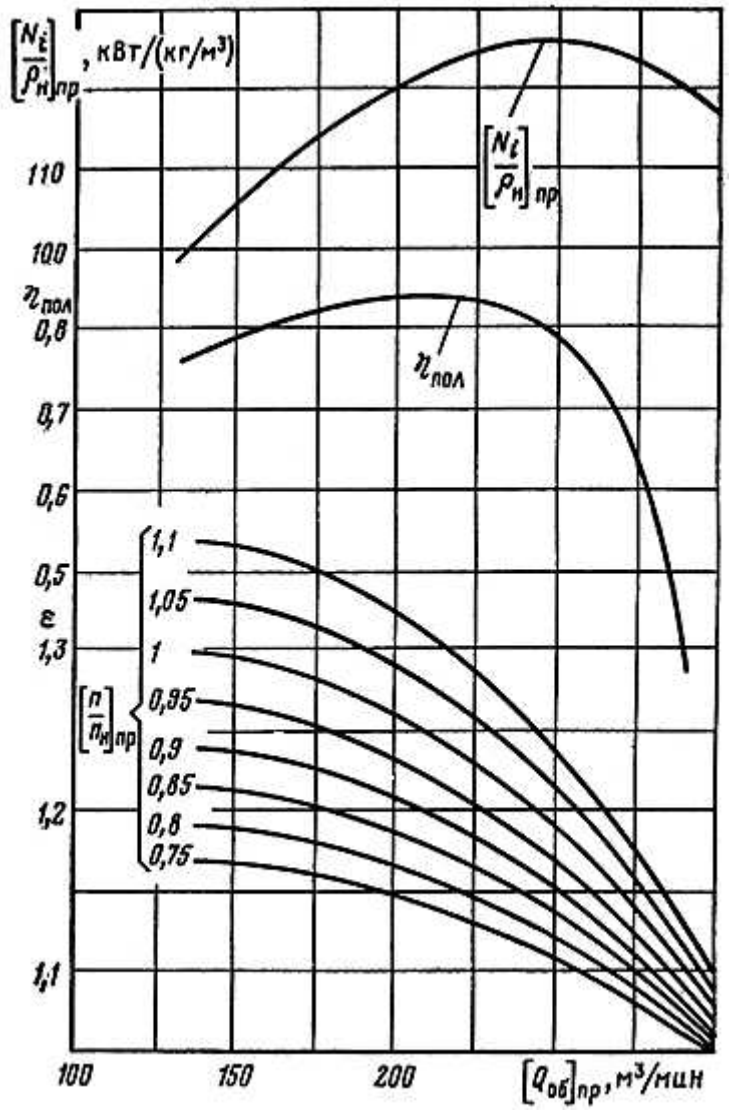


Рис. 5.6. Приведенные характеристики нагнетателя 280 с рабочим колесом диаметром 600 мм (гиперболический покрывающий диск, число лопаток 14) при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$; $z_{\text{пр}} = 0{,}91$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

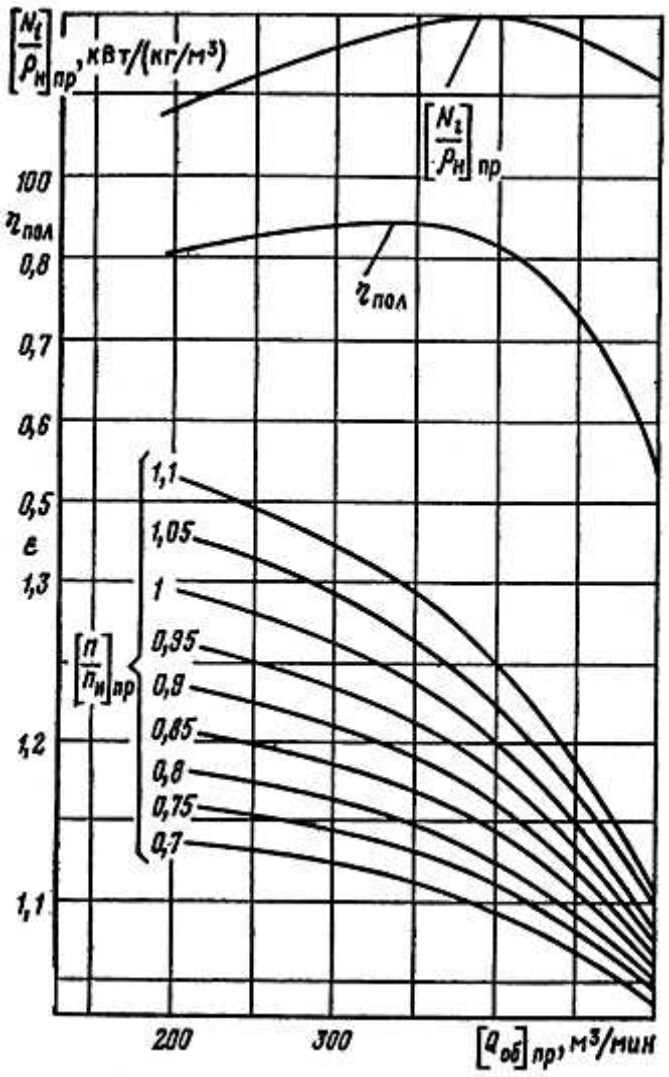


Рис. 5.7. Приведенные характеристики нагнетателя Н-300-1,23 при $[T_{н}]_{пр} = 288\,К$; $z_{пр} = 0{,}91$; $R_{пр} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

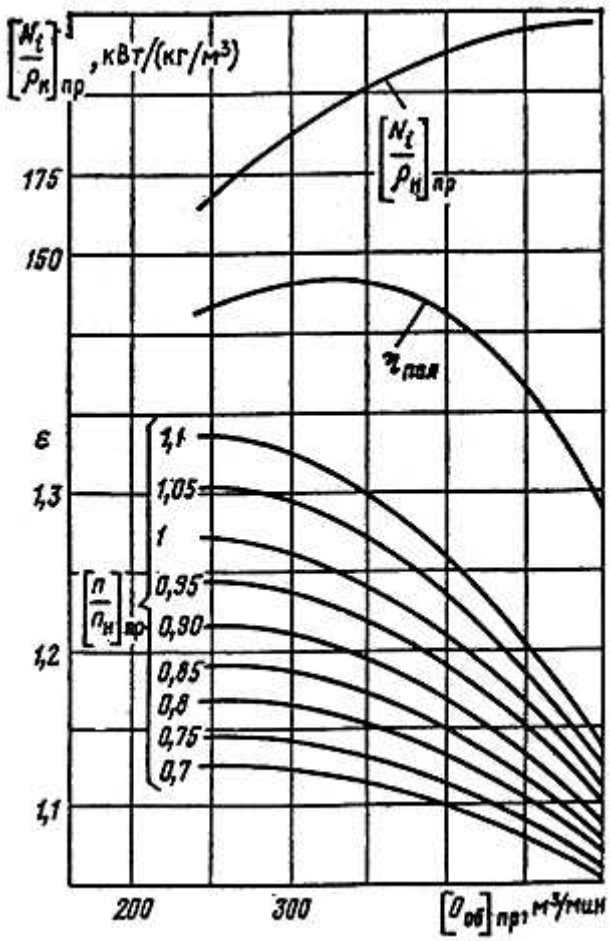


Рис. 5.8. Приведенные характеристики нагнетателя 370-14-1/370-15-1 при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 280$ К;

$z_{\text{пр}} = 0{,}91$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

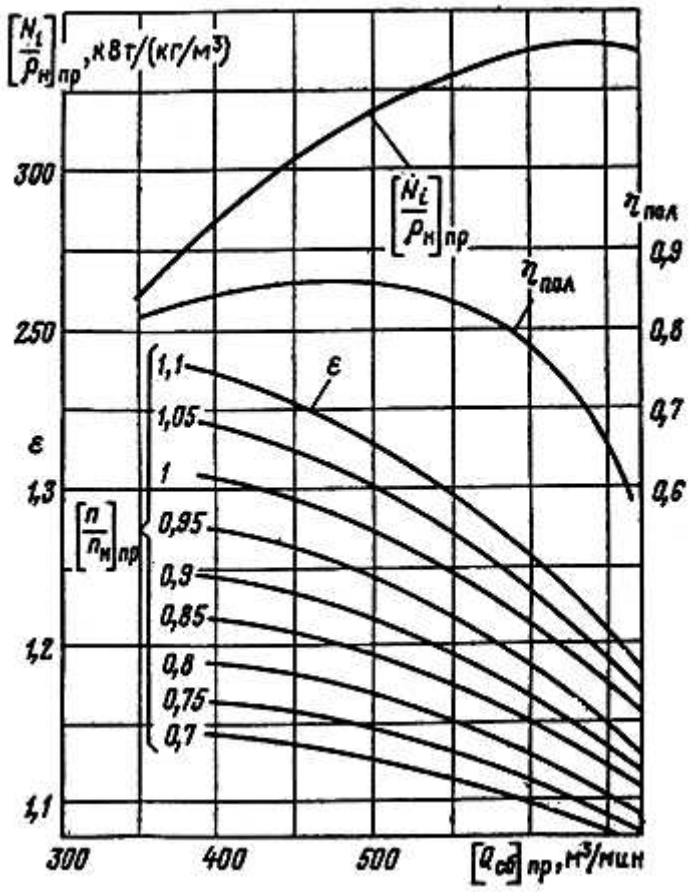


Рис. 5.9. Приведенные характеристики нагнетателя 520-12-1 при $[T_н]_{пр} = 293$ К; $z_{пр} = 0{,}91$; $R_{пр} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

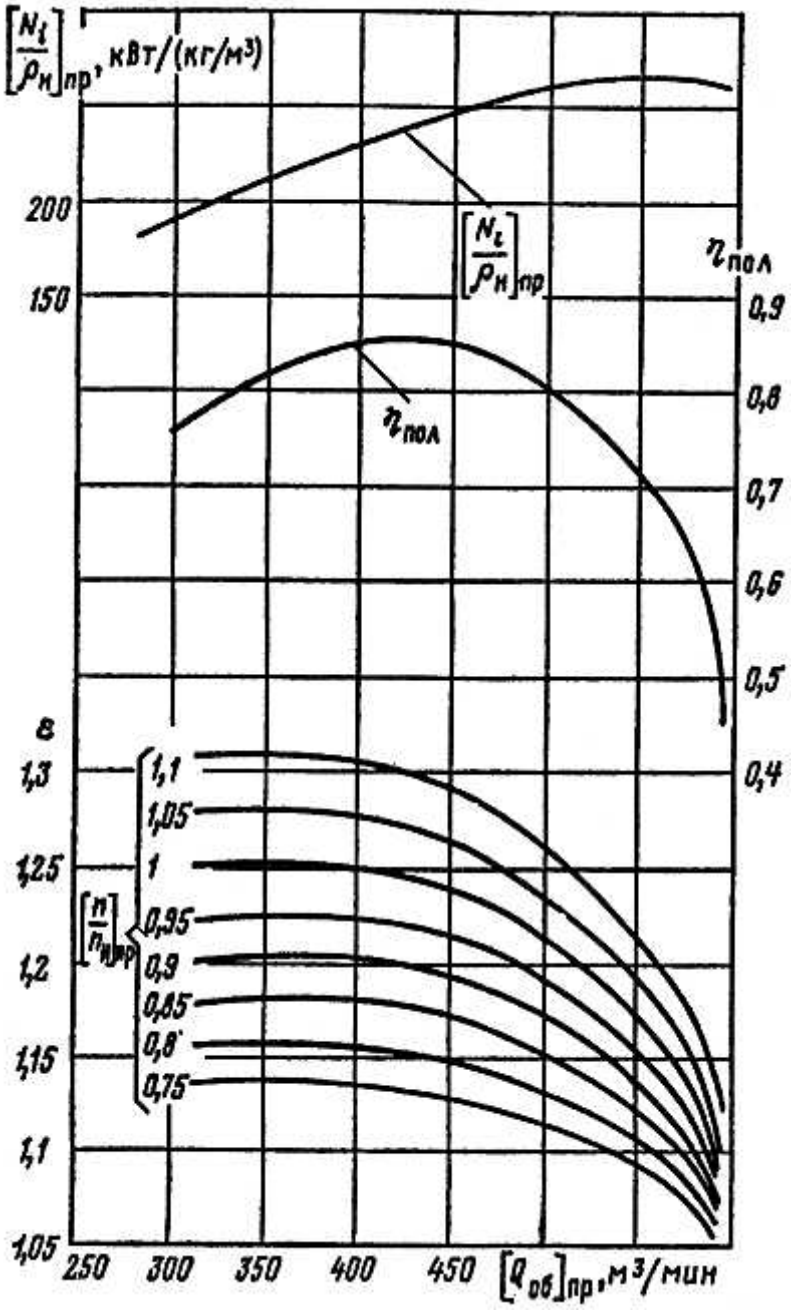


Рис. 5.10. Приведенные характеристики нагнетателя 370-18-1 при $\left[T_{\text{н}}\right]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$; $z_{\text{пр}} = 0{,}9$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

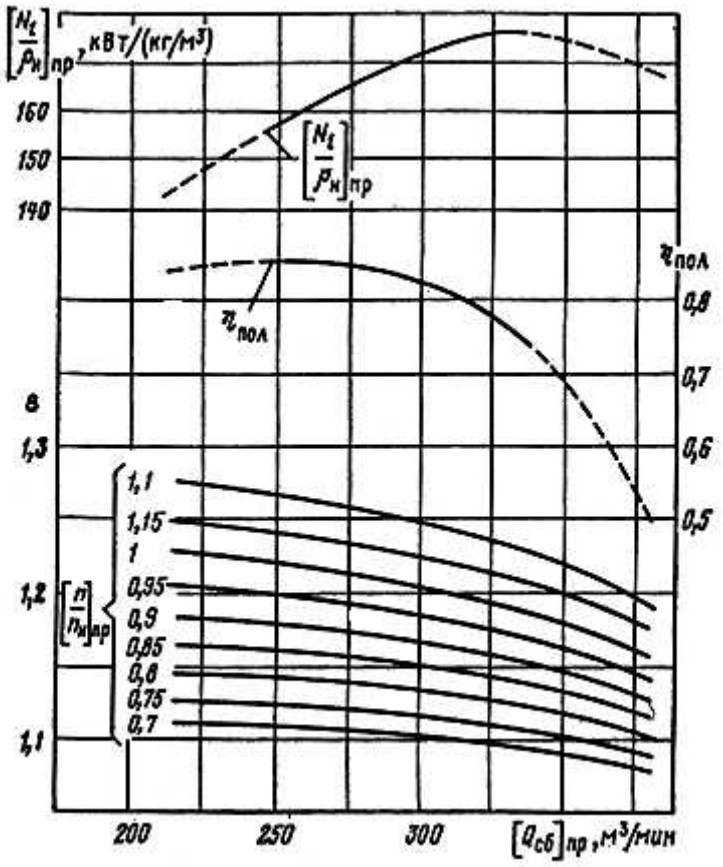


Рис. 5.11. Приведенные характеристики нагнетателя 370-18-1 с зауженным колесом при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 288\,\text{К}$; $z_{\text{пр}} = 0{,}885$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

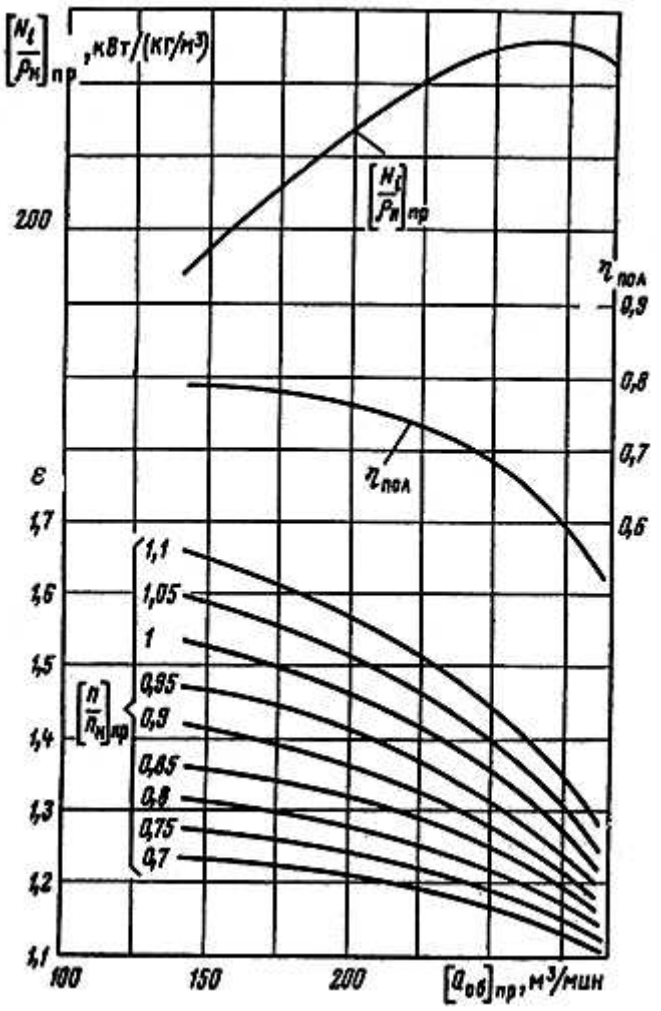


Рис. 5.12. Приведенные характеристики нагнетателя ГПА-Ц-6,3 при $\left[T_{н}\right]_{пр} = 288\,К$;

$z_{пр} = 0{,}9$; $R_{пр} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

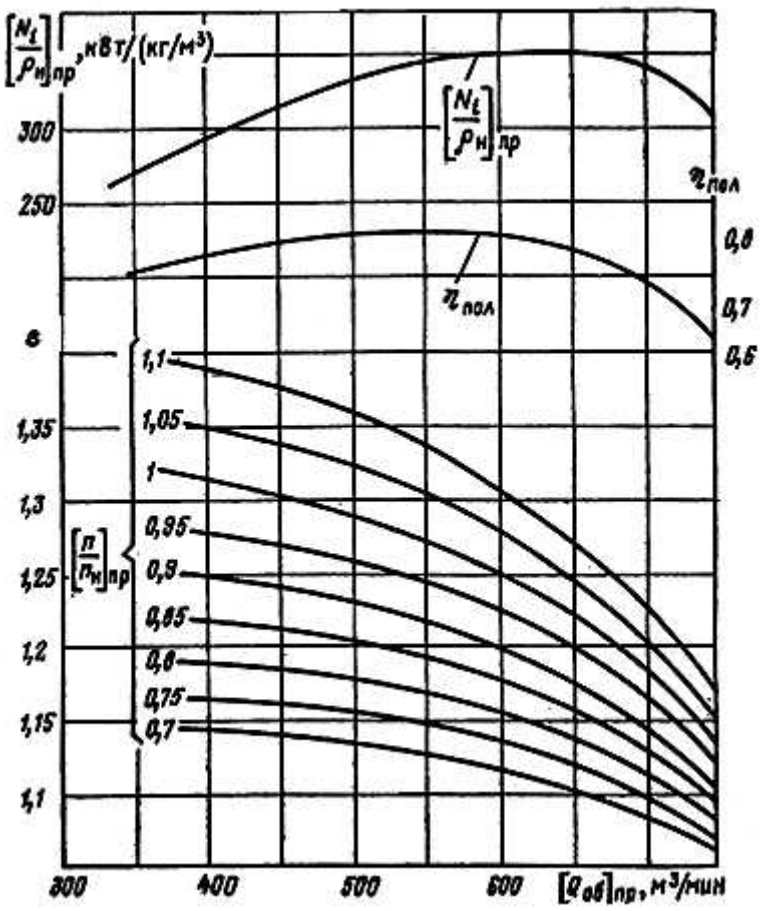


Рис. 5.13. Приведенные характеристики нагнетателя Н-16-76/1,25 при $[T_н]_{пр} = 288$ К; $z_{пр} = 0{,}9$; $R_{пр} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

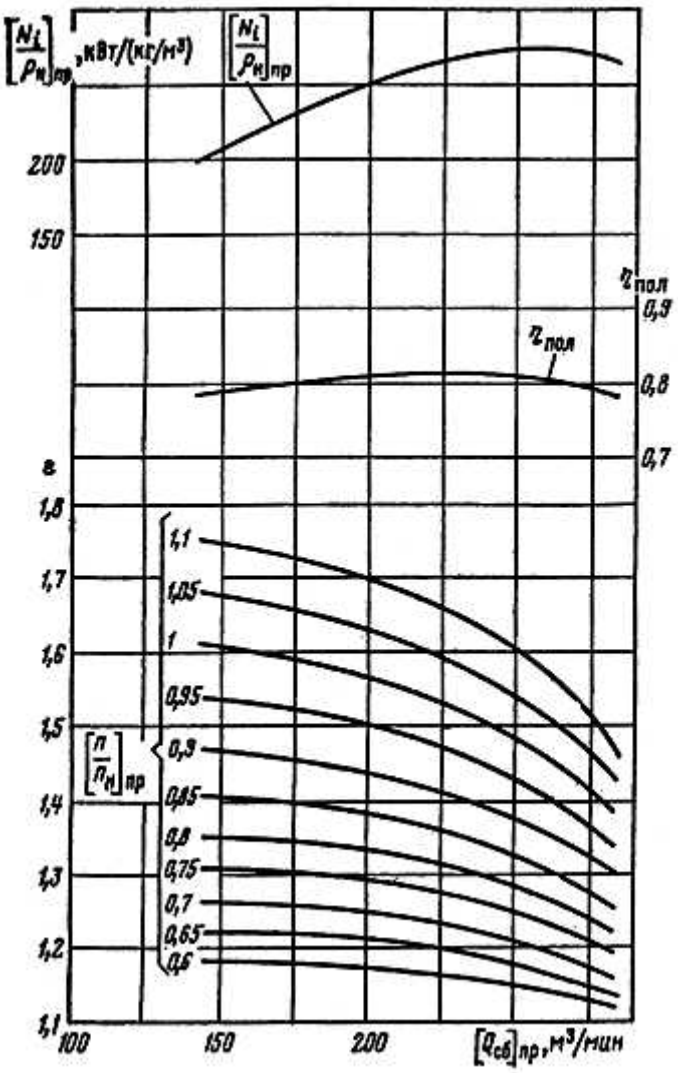


Рис. 5.14. Приведенные характеристики нагнетателя PCL-802/24 при $\left[T_{\text{н}}\right]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$;

$z_{\text{пр}} = 0{,}9$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

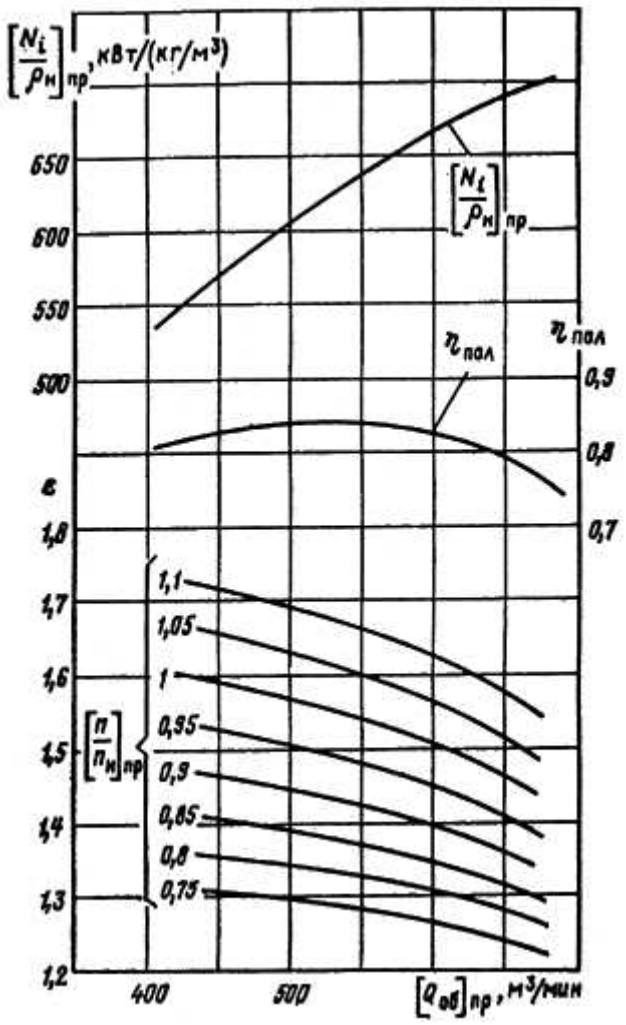


Рис. 5.15. Приведенные характеристики нагнетателя PCL-1002 при $\left[T_{\text{н}}\right]_{\text{пр}} = 288\ \text{К}$;

$z_{\text{пр}} = 0{,}9$; $R_{\text{пр}} = 490$ Дж/(кг·К)

Файл скачан с www.turbinist.ru

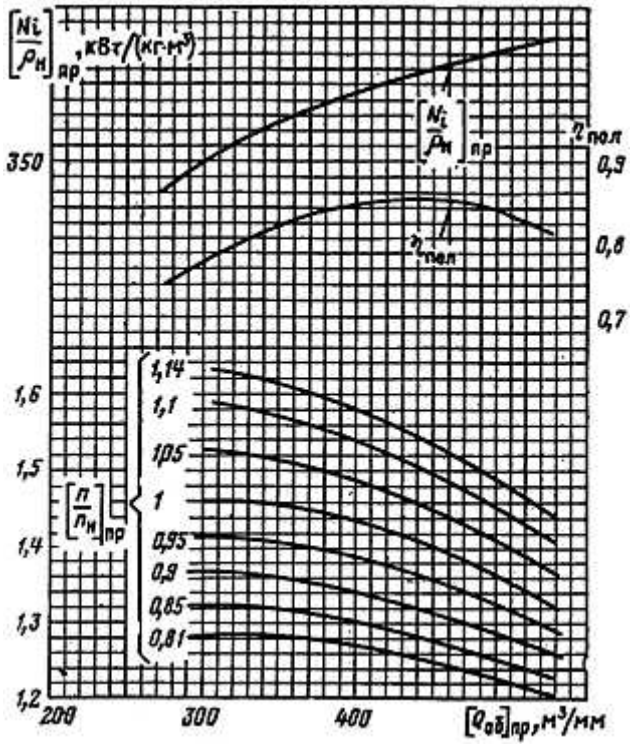


Рис. 5.16. Приведенные характеристики нагнетателя ГПА-Ц-16/76 при $[T_{\text{н}}]_{\text{пр}} = 288$ К; $z_{\text{пр}} = 0{,}901$; $R_{\text{пр}} = 505{,}8$ Дж/(кг·К)

При расчете КС определяются необходимые величины в следующей последовательности.

1. Газовая постоянная, $R' = R/\Delta_{\text{в}}$, Дж/(кг·К), где R = 286,8 Дж/(кг·К) - газовая постоянная воздуха; $\Delta_{\text{в}}$ - относительная плотность по воздуху.

2. Коэффициент сжимаемости z природного газа от приведенных давления и температуры (рис. 5.17).

Файл скачан с www.turbinist.ru

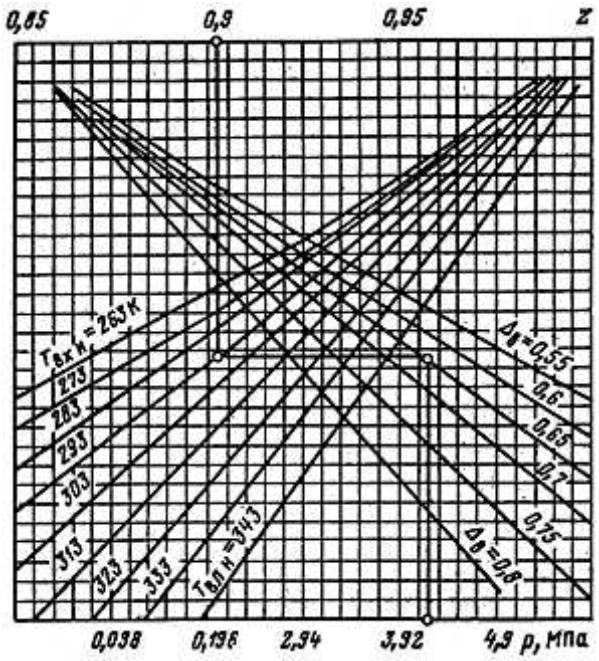


Рис. 5.17. Номограмма для определения коэффициента сжимаемости газа z по давлению p, температуре $\mathrm{T}_{\text{вх.н}}$ и относительной плотности $\Delta_{\text{в}}$

Последовательность определения: $p \to \Delta_{\text{в}} \to \mathrm{T}_{\text{вх.н}} \to z$

3. Плотность газа при 20 °С и 0,1013 МПа, кг/м^3:

$$\rho_{\text{н}} = \Delta_{\text{в}} \cdot 1{,}205,$$

где 1,205 кг/м^3 - плотность воздуха при 20 °С и 0,1013 МПа.

4. Плотность газа при всасывании, кг/м^3: $\rho = p_{\text{вх}} \cdot 10^6 / (zRT)$, где $p_{\text{вх}}$, T - абсолютные давление и (в МПа) температура (в К) при всасывании.

5. Коммерческая подача группы нагнетателей, млн. м^3/сут: $Q_{\text{к}} = Q_{\text{кКС}} / m$, где $Q_{\text{кКС}}$ - коммерческая подача КС, оборудованной однотипными агрегатами, млн. м^3/сут; m - число параллельно работающих групп.

6. Объемная подача нагнетателя первой ступени, м^3/мин:

$$Q_{\text{об}} = Q_{\text{к}} \rho_{\text{н}} / (1440 \cdot \rho).$$

Для экспресс-расчетов, когда известны подача центробежного нагнетателя, температура и давление на входе в нагнетатель, при определении объемной подачи целесообразно пользоваться номограммой, изображенной на рис. 5.18.

Файл скачан с www.turbinist.ru

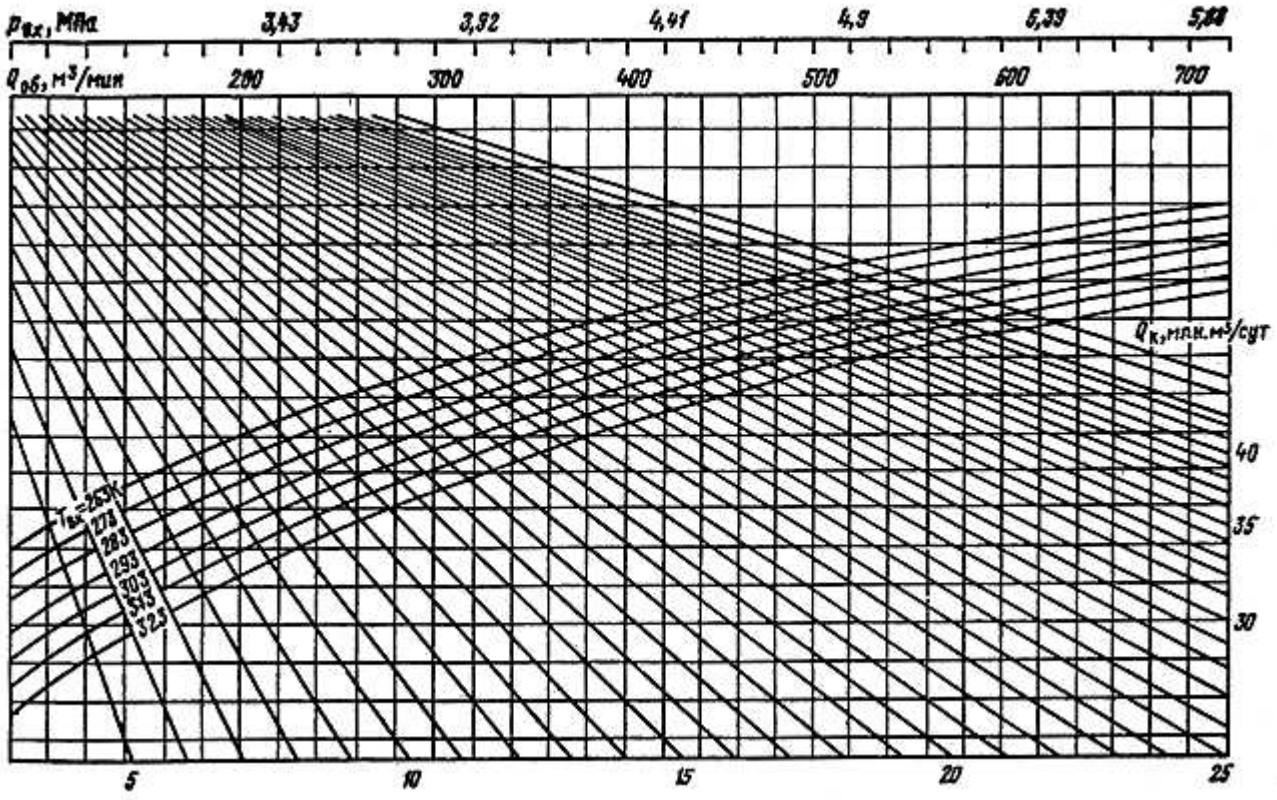


Рис. 5.18. Номограмма для расчета объемной подачи $Q_{об}$ нагнетателей при $R_{пр} = 478\,Дж/(кг\cdot К)$; $\Delta_в = 0{,}6$.

Последовательность определения: $p_{вх} \to Q_к \to Q_{об}$

7. Приведенная объемная подача, м^3/мин: $[Q_{об}]_{пр} = (n_н / n)Q_{об}$, где $n_н$ - номинальная частота вращения ротора нагнетателя, об/мин; n - фактическая частота вращения ротора, об/мин.

8. Приведенная частота вращения:

$$\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр} = \frac{n}{n_н}\sqrt{\frac{z_{пр}R_{пр}[T_н]_{пр}}{zRT}},$$

где $z_{пр}$, $R_{пр}$, $[T_н]_{пр}$ - параметры газа, для которых составлена характеристика нагнетателя.

9. Степень сжатия ε и приведенная относительная мощность $[N_i/\rho]_{пр}$ центробежного нагнетателя по найденным значениям приведенной объемной подачи и приведенной частоты вращения по характеристикам нагнетателя.

10. Внутренняя мощность, потребляемая нагнетателем, кВт:

$$N_i = [N_i/\rho_н]_{пр}\rho(n/n_н)^3_{пр}.$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

11. Мощность на муфте привода, кВт: $N = N_i + N_{\text{мех}}$, где $N_{\text{мех}}$ - механические потери, для газотурбинного привода $N_{\text{мех}}$ = 100 кВт, для электропривода $N_{\text{мех}}$ = 150 кВт.

12. Давление на выходе нагнетателя, МПа: $p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}}\varepsilon$.

13. Температура на выходе нагнетателя

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}}\varepsilon^{\frac{k-1}{k\eta_{\text{пол}}}},$$

где k = 1,31; $\eta_{\text{пол}}$ - политропический к. п. д. нагнетателя.

Расчет второй ступени выполняется аналогично. Температура на входе второй ступени принимается равной температуре нагнетания первой ступени. Давление на входе второй ступени: $p_{\text{вх}} = p_{\text{вых}}$ - (0,015 ÷ 0,025), где $p_{\text{вых}}$ - давление нагнетания первой ступени, МПа; (0,015 ÷ 0,025) МПа - потери в обвязке между первой и второй ступенью.

Пример 5.1. Рассчитать режим работы КС, перекачивающей газ в объеме 65 млн. м^3/сут. Абсолютное давление на входе нагнетателей составляет $p_{\text{вх}}$ = 3,72 МПа, температура 290 К. Компрессорная станция работает двумя параллельными группами с нагнетателями типа 520 с приводом от газовой турбины ГТК-10. Относительная плотность перекачиваемого газа $\Delta = 0{,}6$. Фактическая частота вращения ротора нагнетателя 4600 об/мин.

Решение

Газовая постоянная: $R = \dfrac{286{,}8}{0{,}6} = 478$ Дж/(кг·К).

По номограмме (см. рис. 5.17) z =0,919.

Плотность газа при 20 °С и 0,1013 МПа $\rho_{\text{н}}$= 0,6·1,205 = 0,723 кг/м^3.

Плотность газа при всасывании

$$\rho = \frac{3{,}72 \cdot 10^6}{0{,}919 \cdot 290 \cdot 478} = 29{,}2 \text{ кг/м}^3.$$

Подача одной группы последовательно включенных нагнетателей

$$Q_{\text{к}} = 65\,000\,000/2 = 32\,500\,000 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Объемная подача нагнетателя первой ступени

$$Q_{\text{об}} = 32\,500\,000 \cdot 0{,}724/(1440 \cdot 29{,}2) = 561{,}5 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Приведенная объемная подача нагнетателя первой ступени

$$[Q_{\text{об}}]_{\text{пр}} = (4800/4600) \cdot 561{,}5 = 586 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Приведенная частота вращения

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\left[\frac{n}{n_{\text{н}}}\right]_{\text{пр}} = \frac{4600}{4800}\sqrt{\frac{0{,}91\cdot 490\cdot 293}{0{,}919\cdot 478\cdot 290}} = 0{,}968,$$

где 0,91, 490 и 293 - значения приведенных величин по графику на рис. 5.9.

По графику на рис. 5.9 степень сжатия $\varepsilon = 1{,}21$, приведенная относительная внутренняя мощность $\left[N_i/\rho\right]_{\text{пр}} = 337$ кВт/(кг·м^3), $\eta = 0{,}82$.

Внутренняя мощность, потребляемая нагнетателем: $N_i = 337\times 29{,}1\cdot 0{,}968^3 = 8895$ кВт.

Мощность на валу привода $N = 8895+100 = 8995$ кВт.

Давление на выходе нагнетателя первой ступени $p_{\text{вых}} = 3{,}8\times 1{,}21 = 4{,}6$ МПа.

Температура газа на выходе первой ступени

$$T_{\text{вых}} = 290\cdot 1{,}21^{\frac{1{,}31-1}{1{,}31\cdot 0{,}82}} = 306 \text{ К}.$$

Расчет режима работы второй ступени нагнетания выполняется аналогично расчету режима работы первой ступени.

5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исходя из того, что приведенные характеристики (параметры) всех двухвальных газотурбинных установок (ГТУ) (за исключением агрегатов ГТК-10И и ГТН-25И, имеющих поворотные направляющие аппараты силовой турбины) были обобщены, т. е. представлены в относительной форме - в виде зависимости параметров, отнесенных к номинальным значениям (см. табл. 5.1), относительные приведенные параметры ГТУ определяют по следующим формулам:

приведенная относительная мощность

$$\overline{N}_{\text{епр}} = \frac{N_{\text{e}}}{N_{\text{e0}}}\sqrt{\frac{T_{a0}}{T_{\text{a}}}}\,\frac{p_{\text{a0}}}{p_{\text{a}}}, \qquad (5.1)$$

где N_{e0} и N_{e} - номинальная и фактическая мощности ГТУ; T_{a0} и T_{a} - номинальная и фактическая температуры наружного воздуха; p_{a0} и p_{a} номинальное и фактическое атмосферные давления;

относительный к. п. д. ГТУ

$$\overline{\eta}_{\text{e}} = \eta_{\text{e}}/\eta_{\text{e0}}, \qquad (5.2)$$

где η_{e0} и η_{e} - номинальный и фактический к. п. д. ГТУ;

приведенная относительная температура по трактам ГТУ

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\overline{T}_{\text{пр}} = \frac{T}{T_0}\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}, \qquad (5.3)$$

где T_0 и T - номинальная и фактическая температуры;

приведенный относительный расход топливного газа

$$\overline{G}_{\text{т.г пр}} = \frac{G_{\text{т.г}}}{G_{\text{т.г0}}}\sqrt{\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}}\frac{p_{\text{а0}}}{p_{\text{а}}}\frac{Q_{p0}}{Q_p}, \qquad (5.4)$$

где $G_{\text{т.г0}}$ и $G_{\text{т.г}}$ - номинальный и фактический расход топливного газа; Q_{p0} и Q_p - номинальная и фактическая теплота сгорания;

относительная степень сжатия в компрессоре

$$\bar{\varepsilon}_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{к}} / \varepsilon_{\text{к0}}, \qquad (5.5)$$

где $\varepsilon_{\text{к0}}$ и $\varepsilon_{\text{к}}$ - номинальная и фактическая степень сжатия;

приведенный относительный расход воздуха через компрессор

$$\overline{G}_{\text{вх пр}} = \frac{G_{\text{вх}}}{G_{\text{вх0}}}\sqrt{\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}}\frac{p_{\text{а0}}}{p_{\text{а}}}, \qquad (5.6)$$

где $G_{\text{вх 0}}$ и $G_{\text{вх}}$ - номинальный и фактический расход воздуха;

приведенная относительная частота вращения

$$\bar{n}_{\text{пр}} = \frac{n}{n_0}\sqrt{\frac{T_{\text{вх0}}}{T_{\text{вх}}}}, \qquad (5.7)$$

где n_0 и n - номинальная и фактическая частота вращения;

относительная степень расширения газа в турбине

$$\bar{\varepsilon}_{\text{т}} = \varepsilon_{\text{т}} / \varepsilon_{\text{т0}}, \qquad (5.8)$$

где $\varepsilon_{\text{т0}}$ и $\varepsilon_{\text{т}}$ - номинальная и фактическая относительная степень расширения.

Каждый относительный параметр, приведенный к нормальным или номинальным условиям (см. табл. 5.1) зависит от приведенной относительной мощности. Эти же и некоторые другие параметры могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\overline{N}_{\text{е пр}} = 1 - 4{,}2\left(1 - \overline{T}_{\text{вх ТВД пр}}\right)\overline{T}_{\text{вх ТВД пр}}, \qquad (5.9)$$

где $T_{\text{вх ТВД пр}}$ - приведенная температура на входе турбины;

$$\bar{\varepsilon}_{\text{к}} = \overline{N}_{\text{е пр}}^{0{,}42}; \qquad (5.10)$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\overline{n}_{\text{ТВД пр}} = \overline{N}_{\text{e пр}}^{0,21}; \qquad (5.11)$$

$$\overline{G}_{\text{вх к пр}} = \overline{N}_{\text{e пр}}^{0,33}; \qquad (5.12)$$

где $\overline{G}_{\text{вх к пр}}$ - приведенный расход на входе компрессора;

$$\overline{\eta}_{\text{e}} = \frac{\overline{N}_{\text{e пр}}}{1 - 0,75\left(1 - \overline{N}_{\text{e пр}}\right)}; \qquad (5.13)$$

$$\overline{G}_{\text{т.г пр}} = 1 - 0,75\left(1 - \overline{N}_{\text{e пр}}\right), \qquad (5.14)$$

где $G_{\text{т.г пр}}$ - приведенный расход топливного газа.

Приведенная температура на выходе турбины низкого давления

$$\overline{T}_{\text{выхТНД}_{\text{пр}}} = 1 - 0,165\left(1 - \overline{N}_{\text{e пр}}\right); \qquad (5.15)$$

Приведенная температура на выходе компрессора

$$T_{\text{вых к пр}} = \overline{N}_{\text{e пр}}^{0,133}. \qquad (5.16)$$

Зависимость основных обобщенных относительных характеристик ГТУ от относительной мощности изображена на рис. 5.19.

Файл скачан с www.turbinist.ru

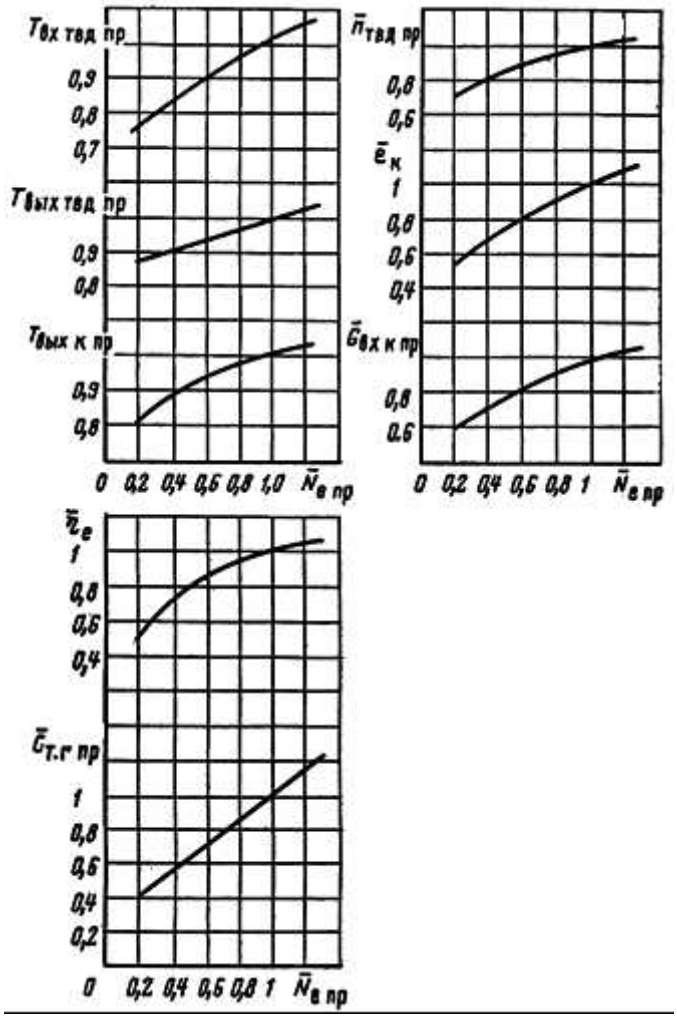


Рис. 5.19. Обобщенные относительные характеристики ГТУ

Для определения основных параметров ГТУ в случае отклонения режима ее работы от номинального, в частности при снижении оборотов ТНД, служат характеристики, приведенные на рис. 5.20.

Файл скачан с www.turbinist.ru

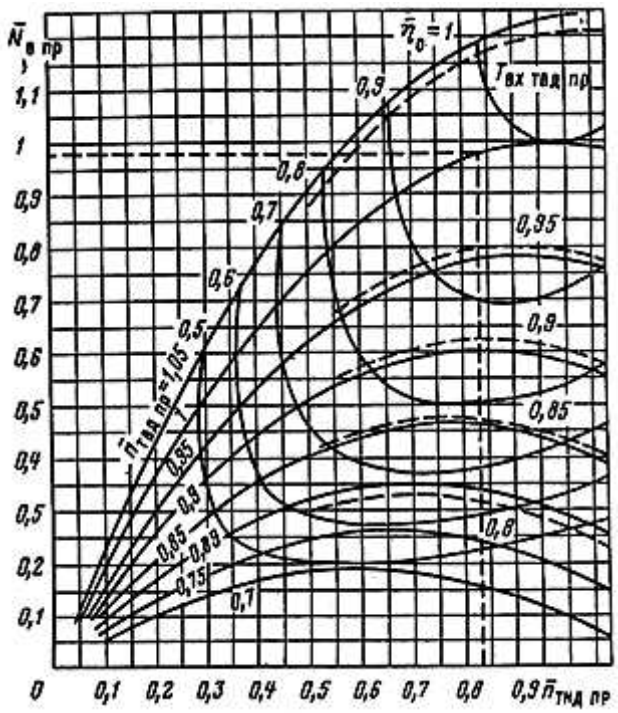


Рис. 5.20. Диаграмма режимов

При увеличении сопротивления входного и выходного трактов от приведенных в табл. 5.1, а также в случае отбора сжатого воздуха за компрессором проводится корректировка относительной мощности $\overline{N}_{e}$ и относительного к. п. д. ГТУ $\overline{\eta}_{e}$:

Параметр	N_{e}, %	$\overline{\eta}_{e}$, %
Увеличение сопротивления на 0,1013 МПа:		
входного тракта	$\frac{-3}{-2}$	$\frac{-1,5}{-1,2}$
выходного тракта	$\frac{-2}{-1}$	$\frac{-1,5}{-1,2}$
Отбор воздуха за осевым компрессором в количестве 1 % от общего расхода через него.	-3,7	-2

Примечание. В числителе - ГТУ со степенью сжатия компрессора до 6; в знаменателе = более 6.

Пример 5.2. Агрегат ГТК-10 имеет частоту вращения ТНД 3950 об/мин и температуру перед ТВД 770 °С. Температура наружного воздуха t_{a} = +5 °С, барометрическое давление p_{a} = 0,1 МПа, низшая теплотворная способность топлива $Q_{н\,р}$ = 34 332 кДж/м^{3}. За осевым компрессором отбор воздуха в количестве 1 % от общего расхода через компрессор. Определить основные параметры ГТУ.

Решение

Приведенная относительная температура перед ТВД (см. формулу 5.3)

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\overline{T}_{\text{вх ТВД пр}} = \frac{770+273}{780+273} \cdot \frac{15+273}{5+273} = 1{,}026 .$$

Приведенные относительные обороты ТНД (см. формулу 5.7)

$$\overline{n}_{\text{ТНД пр}} = \frac{3950}{4800}\sqrt{\frac{15+273}{5+273}} = 0{,}83 .$$

На диаграмме режимов (см. рис. 5.20) по $\overline{n}_{\text{ТНД пр}}$ и $\overline{T}_{\text{вх ТВД пр}}$ определяем относительную приведенную мощность. $\overline{N}_{\text{e пр}} = 1{,}075$. По графикам (рис. 5.19) $\overline{T}_{\text{выхТНД}_{\text{пр}}} = 1{,}02$; $\overline{T}_{\text{вых к пр}} = 1{,}025$; $\overline{n}_{\text{ТВД пр}} = 1{,}03$; $\overline{\varepsilon}_{\text{к}} = 1{,}09$; $\overline{G}_{\text{вх к пр}} = 1{,}04$; $\overline{\eta}_{\text{e}} = 1{,}03$; $\overline{G}_{\text{тг пр}} = 1{,}13$.

Фактические значения параметров на заданном режиме определяются по формулам 5.1-5.7.

$$N_{\text{e}} = \frac{1{,}075 \cdot 10000}{\sqrt{\frac{288}{278}} \cdot \frac{0{,}1013}{0{,}1}} = 10426{,}8 \text{ кВт.}$$

С учетом потери 3 % мощности из-за отбора воздуха за компрессором $N_{\text{e}} = 10426{,}8 - (10426{,}8 \cdot 0{,}037) = 10041{,}8$ кВт

$$T_{\text{вых ТНД}} = \frac{1{,}02 \cdot 768 \cdot 278}{288} = 756 \text{ К (483 °С);}$$

$$T_{\text{вых к}} = \frac{1{,}025 \cdot 463 \cdot 278}{288} = 458{,}1 \text{ К (185,1 °С);}$$

$$n_{\text{ТВД}} = \frac{1{,}03 \cdot 5200}{\sqrt{\frac{288}{278}}} = 5261 \text{ об/мин;}$$

$$\varepsilon_{\text{к}} = 1{,}09 \cdot 4{,}4 = 4{,}7;$$

$$G_{\text{вх к}} = \frac{1{,}04 \cdot 86{,}2}{\sqrt{\frac{288}{278}}} \cdot \frac{0{,}1013}{0{,}1} = 89{,}2 \text{ кг/с;}$$

$$\eta_{\text{e}} = 1{,}03 \cdot 29 = 29{,}87.$$

С учетом потери к. п. д. из-за отбора воздуха за компрессором $\eta_{\text{e}} = 29{,}87-(29{,}87 \cdot 0{,}02) = 29{,}27$.

$$G_{\text{тг}} = \frac{1{,}13 \cdot 3600}{\sqrt{\frac{288}{278}}} \cdot \frac{0{,}1013}{0{,}1} \cdot \frac{34332}{34541} = 4023 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

5.4. РАСЧЕТ РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ ГТУ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ КС

Располагаемая мощность ГТУ - это максимальная рабочая мощность на муфте, которую может развить ГТУ в конкретных станционных условиях. Ее величина определяется внешними эксплуатационными условиями, уровнем технического состояния, параметрами эксплуатационных ограничений и другими факторами.

Эксплуатационными ограничениями располагаемой мощности ГТУ различных типов могут служить разные параметры (температура на входе и выходе турбины, между турбинами, частота вращения ротора турбокомпрессора и т. д.).

Располагаемая мощность ГТУ

$$N_{\text{ер}} = N_{\text{е0}} K_N K_{\text{обл}} \left(1 - K_t \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{а0}}}{t_{\text{вх}} + 273}\right) \frac{p_{\text{а}}}{0{,}1013}, \qquad (5.17)$$

где K_N - коэффициент технического состояния ГТУ (табл. 5.3); $K_{\text{обл}}$ - коэффициент, учитывающий влияние системы противообледенения (0,87 - для ГТК-10, 1 - для остальных типов ГПА); K_t - коэффициент, учитывающий влияние температуры атмосферного воздуха на мощность ГТУ (см. табл. 5.3); $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{а0}}$ - фактическая и номинальная температура воздуха на входе ГТУ, °С; $p_{\text{а}}$ - абсолютное барометрическое давление воздуха, МПа.

Температура воздуха на входе ГТУ

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{а}} + \delta_t + \delta_n - \delta_{\text{в.0}},$$

где $t_{\text{а}}$ - расчетная температура атмосферного воздуха месяца, сезона, квартала, °С (см. СНиП 2.01.01-82 "Строительная климатология и геофизика"); δ_t - поправка на изменчивость климатических данных (2,5 °С для среднемесячной и 1,5°С для среднесезонной температуры); $\delta_{\text{п}}$ - поправка на местный подогрев атмосферного воздуха (в среднем 2,5°С); $\delta_{\text{в.0}}$ - поправка, учитываемая при работе установок водоиспарительного охлаждения в летнее время (6-10 °С).

Таблица 5.3

Параметры и коэффициенты для определения индивидуальных норм затрат топливного газа и поправочных коэффициентов к нормам

Параметр или коэффициент	ГТ-700-4	ГТ-700-5	ГТК-5	ГТ-750-6	ГТ-6-ГТН-6	ГПА-Ц-6,3	ГТН-9-750	ГТК-10	ГПА-10	ГТК-16	ГТН-16	ГТН-25	ГТК-10И	"К-1
Номинальная мощность ГТУ $N_{\text{е0}}$, кВт	4400	4250	4400	6000	6300	6300	10000	10000	10000	16000	16000	25000	9700	12
Номинальный кпд. ГТУ $\eta_{\text{е0}}$	0,16	0,25	0,26	0,27	0,24	0,225	0,19	0,29	0,265	0,25	0,29	0,28	0,257	0,
Номинальная температура воздуха	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	

Файл скачан с www.turbinist.ru

на входе ГТУ t_{30} °С														
Коэффициент технического состояния ГТУ по топливному газу $K_{\text{т.г}}$	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,03	1.05	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1
Коэффициент технического состояния ГТУ по мощности K_N	0,8	0,8	0,8	0,8	0,59	0,95	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0
Коэффициент, учитывающий влияние работы системы противообледенения на к. п. д. ГТУ $K_{\text{т.обл}}$	1	1	1	1	1	1	1	1,04	1,025	1	1	1	1	
Коэффициент, учитывающий влияние температуры атмосферного воздуха на мощность ГТУ K_t	4,4	4,4	4,4	3,7	3,7	1.3	3,7	3,7	3,7	3,2	3,2	3,4	2	
Номинальный политропический к. п. д. нагнетателя $\eta_{\text{п0}}$	0,84	0,84	0,87	0,86	0,83	0,82	0,85	0,85	0,85	0,83	0,82	0,83	0,83	0
Коэффициент режима работы нагнетателя $K_{\text{реж}}$	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0
Коэффициент гидравлических сопротивлений между ступенями сжатия $K_{\text{с}}$	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	1	0,985	0,985	0,985	0,985	1	1	1	
Механический к. п. д. нагнетателя $K_{\text{м}}$	0,95	0,955	0,975	0,985	0,975	0,98	0,99	0,99	0,99	0,995	0,995	0,995	0,99	0,
Коэффициент потерь (утечек) газа в топливном коллекторе $K_{\text{ут}}$	0,985	0,985	0,985	0,985	0,99	0,99	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,
Коэффициент наработки $K_{\text{нар}}$ для диапазона:														
25-50 тыс.ч.	1,05	1,05	1,05	1,05	1,02	1,02	1,05	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1
50-100 тыс.ч.	1,08	1,08	1,08	1,08	1,04	1,04	1,08	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1

Расчетное давление воздуха является функцией расположения КС над уровнем моря:

Файл скачан с www.turbinist.ru

Расчетное давление атмосферного воздуха

Высота над уровнем моря, м	0	250	500	750	1000	1250	1500
Абсолютное давление атмосферного воздуха, МПа	0,102	0,098	0,0954	0,0925	0,0897	0,0872	0,0846

Для газотурбинных установок имеется общее конструктивное ограничение максимальной располагаемой мощности - 100 % для ГПА-10 и 115 % для агрегатов остальных типов.

Пример 5.2. Агрегат ГТН-16 работает в следующих условиях:

среднемесячные температуры $t_{\text{а}}$ атмосферного воздуха в июне, июле, августе соответственно 23, 25,6 и 23,5 °С; атмосферное давление 0,1013 МПа; система водоиспарительного охлаждения отсутствует ($\delta_{\text{в.0}} = 0$). Коэффициент технического состояния K_N = 0,95. Определить для летнего сезона располагаемую мощность при отсутствии вибрационных и прочих ограничений. Низшая теплота сгорания номинальная.

Решение

1. По табл. 5.1 N_{e0} = 16000 кВт; $K_t = 3{,}2$.

2. Средняя температура летнего сезона

$$t_{\text{а}} = \frac{23 + 25{,}6 + 23{,}5}{3} = 24 \ ^{\circ}\text{C}.$$

3. Температура воздуха на входе в осевой компрессор: $t_{\text{вх}} = 24{,}0 + 1{,}5 + 2{,}5 = 28$ °С.

4. Располагаемая мощность ГТУ

$$N_{\text{ер}} = 16000 \cdot 0{,}95\left(1 - 3{,}2\frac{28-15}{28+273}\right)\cdot\frac{0{,}1013}{0{,}1013} = 13\,100 \text{ кВт}.$$

Этот метод требует дополнительного определения коэффициента технического состояния по каждому агрегату в КЦ в отдельности.

5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА МУФТЕ НАГНЕТАТЕЛЬ - ГТУ ПО ПАРАМЕТРАМ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

Мощность на муфте нагнетатель - ГТУ определяют по формуле

$$N_{\text{e}} = \frac{l_{\text{уд}} q}{\eta_{\text{н}}} = 4{,}003 z_{\text{вх}} T_{\text{вх}} \frac{m}{m-1}\left(\varepsilon_{\text{н}}^{\frac{m-1}{m}} - 1\right)\frac{q}{\eta_{\text{н}}},$$

где $l_{\text{уд}}$ - удельная полезная политропическая работа сжатия; q -подача нагнетателя; $\eta_{\text{н}} = \eta_{\text{п}} K_{\text{м}}$ - к.п.д. нагнетателя; $\eta_{\text{п}}$ - политропическии к.п.д.; $K_{\text{м}}$ - механический к.п.д. ;

Файл скачан с www.turbinist.ru

$z_{вх}$, $T_{вх}$ - коэффициент сжимаемости и температура на входе нагнетателя; m - коэффициент политропического сжатия, $m = 0{,}3$; $\varepsilon_н$ - степень сжатия нагнетателя.

Можно использовать более простое выражение для удельной полезной работы (погрешность до 1 % при степенях сжатия до 2 и к.п.д. 0,7-0,85):

$$l_{уд} = 2{,}04 z_{вх} T_{вх} \left(\varepsilon_н - 1/\ \varepsilon_н\right). \qquad (5.18)$$

Мощность, потребляемая нагнетателем, не может быть больше располагаемой мощности привода $N_e \le N_{ер}$.

Анализ данных испытаний нагнетателей показывает, что снижение политропического к.п.д. в процессе эксплуатации может составлять 1-7 %. Основными причинами ухудшения технического состояния нагнетателей являются: эрозия проточной части; увеличение зазоров в уплотнениях покрывающего диска; загрязнение проточной части.

Эрозия элементов нагнетателя наблюдается в случаях, когда в транспортируемом газе присутствуют механические примеси в количестве, превышающем требованиям ГОСТ.

Эксплуатационный к.п.д. нагнетателя является функцией номинального к.п.д., технического состояния, режима работы и механических потерь в нагнетателе:

$$\eta_н = K_{Nн} K_{реж} K_м \eta_{п0},$$

где $K_{Nн} = 0{,}95$, $K_{реж}, K_м$ - коэффициенты, учитывающие соответственно техническое состояние, режим работы нагнетателя и механические потери; $\eta_{по}$ - номинальный политропический к.п.д., определяемый техническим уровнем нагнетателя (см. табл. 5.3).

5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВНОГО ГАЗА ДЛЯ ГТУ

Расход топливного газа для ГТУ (в тыс. м^3 /ч) определяют по формуле

$$G_{т.г} = G_{т.г0}\left(0{,}75 K_{заг} + 0{,}25\sqrt{\frac{T_{вх}}{T_{а0}} \cdot \frac{p_а}{p_{а0}}}\right) K_{т.г} K_{обл} K_{т.с}, \qquad (5.19)$$

где $G_{т.г0}$ - номинальный расход топливного газа (см. табл. 5.1); $K_{заг} = N_e / N_{e0}$ - коэффициент загрузки; $K_{т.г}$ - коэффициент технического состояния ГТУ по топливу (см. табл. 5.3); $K_{т.с}$ - коэффициент, учитывающий отклонение теплоты сгорания топлива от номинала;

$$K_{обл}\left(0{,}75 + \frac{0{,}25}{K_{заг}}\sqrt{\frac{T_{вх}}{T_{а0}}}\frac{p_а}{p_{а0}}\right) = K_а$$

- коэффициент, учитывающий параметры атмосферного воздуха (в том числе влияние противообледенительной системы, когда она включена) и степень загрузки.

На основе исследований получена следующая формула для определения коэффициента загрузки:

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$K_{\text{заг}} = \frac{N_{\text{е}}}{N_{\text{е}0}} = K_{\text{и}} \frac{N_{\text{ер}}}{N_{\text{е}0}} = K_N K_{\text{обл}} K_{\text{и}} \left(1 - K_t \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}0}}{t_{\text{вх}} + 273} \right),$$

где $K_{\text{и}} = 0{,}925 + 0{,}0025\left(t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}\,0}\right)$ - коэффициент использования располагаемой мощности.

При поагрегатном расчете расхода топливного газа на многоцеховой КС суммарный расход полностью совпадает с суточным замером. Формула дает очень высокую сходимость результатов.

5.7. НОРМИРОВАНИЕ ЗАТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ЦЕХОВ

Целью нормирования затрат природного газа является наиболее полное и рациональное его использование на КС, определение плановой потребности, а также оценка эффективности его использования на собственные нужды компрессорных цехов.

Основным методом, используемым при разработке норм, является расчетно-аналитическнй метод с использованием как паспортных характеристик, так и опытно-статистических данных о действительных затратах газа по отдельным статьям в различных условиях эксплуатации.

При установлении норм расхода газа должны быть учтены следующие технические, технологические и эксплуатационные факторы:

паспортные (номинальные) характеристики ГТУ и нагнетателей;

поле минусовых допусков на технические показатели ГТУ нагнетателей, предусмотренные техническими условиями и ГОСТ;

техническое состояние ГТУ и нагнетателей по средним статистическим данным в зависимости от времени наработки;

влияние атмосферных и климатических условий на технические показатели агрегата, в том числе и на загрузку ГТУ;

влияние системы противообледенения осевых компрессоров на экономичность работы ГТУ;

использование установок утилизации выхлопных газов ГТУ;

поле возможных эксплуатационных режимов работы нагнетателей;

противопомпажное регулирование и возможные перетечки газа в технологических коммуникациях КС;

подогрев топливного газа;

влияние параметров перекачиваемого газа (температуры, давления, состава газа);

статистические данные о показателях надежности ГПА.

Нормативные затраты природного газа на собственные нужды $Q_{\text{с.н}}$ (в млн. м^3) цеха складываются из затрат на топливный газ $Q_{\text{т.г}}$ и затрат газа на технологические нужды $Q_{\text{т.н}}$ за отчетный (планируемый) период $Q_{\text{с.н}} = Q_{\text{т.г}} + Q_{\text{т.н}}$.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Индивидуальные нормы затрат топливного газа

Нормативные затраты топливного газа - это максимально допустимое количество топливного газа, расходуемое на привод ГПА при компримировании запланированного объема транспортируемого газа. Нормирование затрат топливного газа производится на единицу эффективной (полезной) работы сжатия газа. Нормативные затраты за отчетный период: $Q_{\text{т.г}} = H_{\text{т.г}} L \cdot 10^{-6}$ где $H_{\text{т.г}}$ - индивидуальная норма расхода топливного газа; L - эффективная работа сжатия.

Для оценки работы сжатия газа используют политропическую работу сжатия, которую определяют по формуле:

$$L = l_{\text{уд}} q \tau = 24 l_{\text{уд}} Q ,$$

где $l_{\text{уд}}$ - удельная полезная работа сжатия, определяемая по (5.18); τ - время расчетного периода; Q - объем газа, перекаченного за период.

Индивидуальные нормы затрат топливного газа $H_{\text{т.г}} = K_{\text{т.с}} K_{\text{а}} K_{\text{1нар}} K_{\text{III}} K_{\text{у}} H_{\text{т.ги}}$, где $K_{\text{т.с}}$ - коэффициент теплотворной способности природного газа; $K_{\text{а}}$ - коэффициент параметров атмосферного воздуха (тал.5.4.); $K_{\text{1нар}}$ - коэффициент наработки; $K_{\text{III}} = 1{,}05$ - коэффициент трехступенчатого сжатия транспортируемого газа; $K_{\text{у}}$ - коэффициент влияния утилизаторов выхлопных газов; $H_{\text{т.ги}}$ - исходная индивидуальная норма затрат топливного газа.

Таблица 5.4

Значения коэффициента $K_{\text{а}}$, учитывающего влияние температуры атмосферного воздуха и загрузки ГПА

Тип агрегата	Расчетная температура атмосферного воздуха , °С														
	+40	+30	+25	+20	+15	+10	+5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-40
ГТ-700-4, ГТ-700-5, ГТК-5	1,32	1,22	1,18	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,03	1,015	1	0,985	0,97	0,96	0,94
ГТ-750-6	1,265	1,195	1,165	1,14	1,12	1,1	1,075	1,06	1,04	1,025	1,01	1	0,98	0,97	0,95
ГТ-6-750, ГТН-6	1,2	1,14	1,11	1,09	1,07	1,05	1,03	1,015	1,0	0,99	0,98	0,97	0,95	0,945	0,93
ГПА-Ц-6,3	1,07	1,06	1,055	1,05	1,045	1,04	1,035	1,03	1,025	1,02	1,015	1,01	1,005	1,0	0,99
ГТН-9-750	1,21	1,145	1,12	1,1	1,075	1,055	1,04	1,02	1,005	0,99	098	0,97	0,96	0,95	0,93
ГТК-10	1,21	1,145	1,12	1,1	1,075	1,055	1,1 ------- 1,04*	1,08	1,065	1,05	1,03	1,02	1,01	1	0,98

Файл скачан с www.turbinist.ru

ГПА-10	1,2	1,14	1,115	1,09	1,07	1,05	1,06 ------- 1,035 *	1,04	1,025	1,01	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94
ГТК-16, ГТН-16	1,155	1,11	1,09	1,07	1,055	1,04	1,025	1,01	1,0	0,99	0,98	0,965	0,955	0,95	0,935
ГТН-25	1,1	1,065	1,05	1,03	1,02	1,005	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,925	0,91
ГТН-10И	1,06	1,045	1,035	1,03	1,02	1,01	1	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
"Коберра-182"	1,1	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,04 ------- 1,03*	1,03	1,02	1,015	1,005	1	0,99	0,98	0,97
ГТН-25И	1,065	1,045	1,035	1,025	1,015	1,01	1	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005

е 1,205 кг/м $K_{\text{у}}$ - плотность воздуха при 20 °С и 0,1013 МПа. 4. Плотность газа при всасывании, кг/м: , где , - абсолютные давление и (в МПа) температура (в К) при всасывании.

5. Коммерческая подача группы

наг

нетателей, млн. м $K'_{\text{у}}$/сут: $n_{\text{у}}$, где $n_{\text{у}}$ - коммерческая подача КС, оборудованной однотипными агрегатами, млн. м ^{3}/сут; ^{3} - число параллельно работающих групп.

ивода $H_{\text{т.ги}} = 860 \times 4{,}1868 / (34531 \eta_{\text{ГПА и}})$ = 150 кВт.

12. Давление на выходе нагнетателя, МПа: $\eta_{\text{ГПА и}}$.

13. Температура на выходе нагнетателя ,

где = 1,31; - политропический к. п. д. нагнетателя.

Расчет второй ступени выполняется аналогично. Температура на входе второй ступени принимается равной температуре нагнетания первой ступени. Давление на входе второй ступени: - (0,015 0,025), где - давление нагнетания первой ступени, МПа; (0,015 0,025) МПа - потери в обвязке между первой и второй ступенью.

Пример 5.1. Рассчитать режим работы КС, перекачивающей газ в объ

еме

65 млн. м/

с

ут. Абсолютное давление на входе нагнетателей составл

яет

= 3,72 МПа, т	емпература 2	90 К. Компрессорн
ая станция раб	отает	дву
мя паралл	ьными гр	пами
ел	уп	с
нагнет	елями типа	20 с
ат	5	пр
иводом от	азовой тур	ны ГТ
г	би	К-
10. Относ	ельна	плотн
ит	я	ос
ть пер	ачива	ого г
ек	ем	аз
а . Факти	ская	стота
че	ча	в

Файл скачан с www.turbinist.ru

ращения ро то 4600 о б/ шение ая пост оя г·К). мограмм е 7) =0,9 19 лотность газа п ри а = 0, 6·	ра на гн мин. нная: (см. ри . 20 ° С и 1,205 =	етате ля Ре Газ ов Дж/ (к По но с. 5 .1 П 0,101 3 МП 0,72 3

кг/м.

Плотность газа при всасывании
кг/м.

Подача одной группы последовательно включенных нагнетателей
= 65 000 000/2 = 32 500 000 м/сут.

Объемная подача нагнетателя первой ступени
= 32 500 000·0,724/(1440·29,2) = 561,5 м/мин.

Приведенная объемная подача нагнетателя первой ступени = (4800/46

00)·561,5= 586 м $Q_{т.н} = Q_{п.о} + Q_{т.о} + Q_{т.п}$ /мин.

Приведенная частота вращения

$Q_{п.о}$ = 0,968,

где 0,91, 490 и 293 - значения приведенных величин по графику на рис. 5.9.

По гр

аф

ику на рис. 5.9 степень сжатия $Q_{т.д}$ = 1,21, приведенная относительная внутренняя мощность $Q_{прод}$ = 337 кВт/(кг·м), $Q_{страв}$ = 0,82.

Внутренняя мощность, потребляемая нагнетателем: $Q_{и.г}$ кВт.

Мощность на валу привода $n_{п.о}$ кВт.

Давление на выходе нагнетателя первой ступени $Q_{р.р}$ МПа.

Температура газа на выходе первой ступени τ К.

Расчет режима работы второй ступени нагнетания выполняется аналогично расчету режима работы первой ступени.

Файл скачан с www.turbinist.ru

5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исходя из того, что приведенные характеристики (параметры) всех двухвальных газотурбинных установок (ГТУ) (за исключением агрегатов ГТК-10И и ГТН-25И, имеющих поворотные направляющие аппараты силовой турбины) были обобщены, т. е. представлены в относительной форме - в виде зависимости параметров, отнесенных к номинальным значениям (см. табл. 5.1), относительные приведенные параметры ГТУ определяют по следующим формулам:

приведенная относительная мощность

$n_{\text{ГПА}}$, (5.1)

где $Q_{\text{т.о}}$ и $Q_{\text{т.п}}$ - номинальная и фактическая мощности ГТУ; ^{3} и - номинальная и фактическая температуры наружного воздуха; и номинальное и фактическое атмосферные давления;

относительный к. п. д. ГТУ

, (5.2)

где и - номинальный и фактический к. п. д. ГТУ;

приведенная относительная температура по трактам ГТУ

, (5.3) где и - номинальная и фактическая температуры;

приведенный относительный расход топливного газа

, (5.4)

где и - номинальный и фактический расход топливного газа; и - номинальная и фактическая теплота сгорания;

относительная степень сжатия в компрессоре

, (5.5)

где и - номинальная и фактическая степень сжатия;

приведенный относительный расход воздуха через компрессор

, (5.6)

где и - номинальный и фактически

й

расход воздуха;

приведенная относительная частота вращения

d_1, (5.7)

где $f = d_{\text{ш}} / d_1$ и T, z, R, p - номинальная и фактическая частота вращения;

относительная степень расширения газа в турбине

λ_1, (5.8)

где d_1 и $L_{\text{1экв}}$ - номинальная и фактическая относительная степень расширения.

Каждый относительный параметр, приведенный к нормальным или номинальным условиям (см. табл. 5.1) зависит от приведенной относительной мощности. Эти же и некоторые другие параметры могут быть рассчитаны по следующим формулам:

^{3}, (5.9)

где - приведенная температура на входе турбины;

;

(5

.10)

$V_{\text{п}}$; (5.11)

Файл скачан с www.turbinist.ru

^{3}; (5.12)

где Δ_P - приведенный расход на входе компрессора;

T ; (5.13) $\tau_{\text{п}}$, (5.14)

где $Q_{\text{т.о}} = K_{\text{т.о}} Q_{\text{п}} n_{\text{п}}$ - приведенный расход топливного газа.

Приведенная температура на выходе турбины низкого давления

$K_{\text{т.о}}$; (5.15)

Приведенная температура на выходе компрессора

$Q_{\text{п}} = q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}$. (5.16)

Зависимость основных обобщенных относительных характеристик ГТУ от относительной мощности изображена на рис. 5.19.

Рис. 5.19. Обобщенные относительные характеристики ГТУ

Для определения основных параметров ГТУ в случае отклонения режима ее работы от номинального, в частности при снижении оборотов ТНД, служат характеристики, приведенные на рис. 5.20.

Рис. 5.20. Диаграмма режимов

При увеличении сопротивления входного и выходного трактов от приведенных в табл. 5.1, а также в случае отбора сжатого воздуха за компрессором проводится корректировка относительной мощности $n_{\text{п}}$ и относительного к. п. д. ГТУ :

Параметр , %, %Увеличение сопротивления на 0,1013 МПа:

входного тр

акта

выхо

дного тракта

Отбор воздуха за осевым компрессо

ром в

количестве 1 % от	общего расхода через него. -3	,7 -2 Примечание. В числителе
- ГТУ со степе компрессора до 6; в знамена Пример 5.2. Агр астоту вращения температуру пер ература наружног барометрическое давле шая теплотворная способность 2 кДж/м. За осевым компрессором отбор воздуха в колич	нь теле = бол егат ГТК-10 ТНД 3950 о ед ТВД 770 о воздуха ние = 0,1 топлива ество 1 % о	ю сжатия ее 6. имеет ч б/мин и °С. Темп = +5 °С, МПа, низ = 34 33 т общего

расхода через компрессор. Определить основные параметры ГТУ.

Решение

Приведенная относительная температура

п

Файл скачан с www.turbinist.ru

еред ТВД

(см. формулу 5.3)

$q_5, q_{10}, q_{17}, q_{18}, q_{30}, q_{и.г}, q_{т.а}$.

Приведенные относительные обороты ТНД (см. формулу 5.7)

$n_{ГПА}$.

На диаграмме режимов (см. рис. 5.20) по и определяем относительную приведенную мощность. = 1,075. По графикам (рис. 5.19) = 1,02; = 1,025; = 1,03; = 1,09; = 1,04; = 1,03; = 1,13.

Фактические значения параметров на заданном режиме определяются по формулам 5.1-5.7.

кВт.

С учетом потери 3 % мощности из-за отбора воздуха за компрессором кВт

= 756 К (483 °С);

= 458,1 К (185,1 °С);

= 5261 об/мин;

= 4,7;

= 89,2 кг/с

;

= 1,03·29=29,87.

С учетом потери к. п. д. из-за отбора воздуха з

а компрессором ^{3}= 29,87-(29,87·0,02) = 29,27.

= 4023 м/ч.

5.4. РАСЧЕТ РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ ГТУ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ КС

Располагаемая мощность ГТУ - это максимальная рабочая мощность на муфте, которую может развить ГТУ в конкретных станционных условиях. Ее величина определяется внешними эксплуатационными условиями, уровнем технического состояния, параметрами эксплуатационных ограничений и другими факторами.

Эксплуатационными ограничениями располагаемой мощности ГТУ различных типов могут служить разные параметры (температура на входе и выходе турбины, между турбинами, частота вращения ротора турбокомпрессора и т.

д

.).

Располагаемая мощность ГТУ

$H_{т.н}$, (5.17)

где ^{3} - коэффициент технического состояния ГТУ (табл. 5.3); N_{e0} - коэффициент, учитывающий влияние системы противообледенения (0,87 - для ГТК-10, 1 - для остальных типов ГПА); $n_{ГПА}$ - коэффициент, учитывающий влияние температуры атмосферного воздуха на мощность ГТУ (см. табл. 5.3); τ, $H_{п.ои}$ - фактическая и номинальная температура воздуха на входе ГТУ, °С; $H_{т.ои}$ - абсолютное барометрическое давление воздуха, МПа.

Температура воздуха на входе ГТУ

$H_{т.пи}$,

где - расчетная температура атмосферного воздуха месяца, сезона, квартала, °С (см. СН

иП

2.01.01-82 "Строительная климатология и геофизика"); K_p - поправка на изменчивость климатических данных (2,5 °С для среднемесячной и 1,5°С для среднесезонной температуры); $K_{2нар}, K_{3нар}, K_{4нар}$ - поправка на местный подогрев атмосферного воздуха (в среднем 2,5°С); -

Файл скачан с www.turbinist.ru

поправка, учитываемая при работе установок водоиспарительного охлаждения в летнее время (6-10 °С).

Таблица 5.3 Параметры и коэффициенты для определения индивидуальных норм затрат топливного газа и поправочных коэффициентов к нормам

Параметр или коэффициент

ГТ- 700-4 ГТ- 700-5 ГТК- 5 ГТ- 750-6 ГТ-6- ГТН-6 ГПА- Ц-6,3 ГТН- 9-750 ГТК- 10 ГПА- 10 ГТК- 16 ГТН- 16 ГТН- 25 ГТК- 10И "Кобер- ра-182"ГТН- 25И Номинальная мощность ГТУ , кВт 4400 4250 4400 6000 6300 6300 10000 10000 1000

0 16000 16000

25000 9700 12900 24500 Номинальный кпд. ГТУ 0,16 0,25 0,26 0,27 0,24 0,225 0,19 0,29 0,265 0,25 0,29 0,28 0,257 0,273 0,275 Номинальная температура воздуха на входе ГТУ

°С 10 15 15

15 15

15 15 15 15 15 15 25 25 15 25 Коэффициент технического состояния ГТУ по топливному газу 1,05 1,05 1,05

1,05

1,05 1,03	1.05 1,03	1,03 1,0	3 1,03	1,03 1,0	3 1,03 1,03 Коэ	ффициен т т	ехническо г	о состо
яния ГТУ по мощности [3] 0,8 0,8 0,8 0,8 0,59 95 0,95 Коэффициент, учитывающий влияние работы системы против 1 1 1 1,04 1,025 1 1 1 1 1 1,01 Коэффициент, учитывающий вл ерного воздуха на мощность ГТУ [3] 4,4 4,4 4,4 3,7 3,7 1.3 3,7 3,7 3,7 3,	0,95 ообле иян 2 3,2	0,9 денен ие 3,4	0,9 0 ия на тем 2 2	,95 0 к. п пер 2,2	,95 0 . д. Г ату Ном	,95 0 ТУ ры инал	,95 0, 1 атм ьный	95 0, 1 1 1 осф полит

ропический к. п. д. нагнет

ателя

0,84 0,8	4 0,87	0,86 0,	83 0,82	0,85 0	,85 0,85	0,83 0,82 0,	83 0,83
0,83 0,83 Коэффициент режима работы нагне 0,95 0,95 0,95 0,95 0,96 0,96 0,96 0,96 0,96 0,96 Коэффициент г упенями сжатия [3]0,985 0,985 0,985 0,985 0,985 1 0,985 0,98 Механический к. п. д. нагнетателя [3]0,95 0,955 0,975 0,985 0,975 0,98	тател идрав 5 0 0,99	я 0, личес ,985 0,99	95 0, ких с 0,9 0,99	95 0, опрот 85 1 0,995	95 0, ивлен 1 0,9	95 ий меж 1 1 95 0	0,96 ду ст 1 ,995

0,99 0,995 0,995 Коэффициент потерь (утечек) газа в топливном коллекторе [3]0,985 0,985 0,985 0,985 0,99 0,99 0,995 0,995 0,995 0,995 0,995 0,995 0,995 0,995 0,995 Коэффициент наработки [3] для диапазона:

Файл скачан с www.turbinist.ru

25-50 тыс.ч

1,05 1

,05 1

,05 1,05 1,02 1,02 1,05 1,02 1,02 1,02 1,02 1,02 1,02 1,02 1,02 50-100 тыс.ч. 1,08 1,08 1,08 1,08 1,04 1,04 1,08

1,04

1,04 1,04 1,	0	4		1
,04 1,04 1,04	1,04 Ра	счетное	давлен	ие возд
уха является ф	ункцией располо	жения К	С над у	ровнем
моря:	Расчетное	давлени	е атмос	ферного
воздуха	Высота над уров	нем мор	я, м	0 25
0 500 750 1000	1250 1500 Абсо	лютное	давлени	е атмос
ферного воз	духа, МПа 0,102	0,098	0,0954	0,0925
0,0897 0,0872 0	,0846		Д	ля газо
турбинных устан	овок имеется об	щее кон	структи	вное ог
раничение ма	ксимальной расп	олагаем	ой мощн	ости -
100 % для ГП	А-10 и 115 % дл	я агрег	атов ос	тальных
типов.	Пример 5	.2. Агр	егат ГТ	Н-16 ра
ботает в сле	дующих условиях	:	с	реднеме
сячные те	мпературы атм ос	ферного в	оздуха в	июне, и юл
е, августе со	ответственно 23	, 25,6	и 23,5	°С; атм
осферное давление 0	,1013 МПа; сист	ема вод	оиспари	тельног
о охлажд ен	ия отсутствует (	= 0). К оэ	ффициен т	техниче ск

ого состояния $H_{т.ни}$ = 0,95. Определить для летнего сезона располагаемую мощность при отсутствии вибрационных и прочих ограничений. Низшая теплота сг орания номинальная.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Решение

1. По табл. 5.1 $H_{\text{т.ни}}$ = 16000 кВт; K_p = 3,2.

2. Средняя температура летнего сезона

K_p °С.

3. Температура воздуха на входе в осевой компрессор: K_p = 28 °С.

4. Располагаемая мощность ГТУ

$K_{2\text{нар}}$ = 13 100 кВт.

Этот метод требует дополнительного определения коэффициента технического состояния по каждому агрегату в КЦ в отдельности.

5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА МУФТЕ НАГНЕТАТЕЛЬ - ГТУ ПО ПАРАМЕТРАМ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

Мощность на муфте нагнетатель - ГТУ определяют по формуле

$K_{2\text{нар}}$,

где $K_{2\text{нар}}$ - удельная полезная политропическая работа сжатия; $K_{2\text{нар}}$ -подача нагнетателя; $K_{3\text{нар}}$ - к.п.д. нагнетателя; $K_{3\text{нар}}$ - политропическии к.п.д.; $K_{3\text{нар}}$ - механический к.п.д. ; ^{3}, $K_{4\text{нар}}$ - коэффициент сжимаемости и температура на входе нагнетателя; $K_{4\text{нар}}$ - коэффициент политропического сжатия, $K_{4\text{нар}}$ = 0,3; $K_{4\text{нар}}$ - степень сжатия нагнетателя.

Можно использовать более простое выражение для удельной полезной работы (погрешность до 1 % при степенях сжатия до 2 и к.п.д. 0,7-0,85):

. (5.18)

Мощность, потребляемая нагнетателем, не может быть больше располагаемой мощности привода .

Анализ данных испытаний нагнетателей показывает, что снижение политропического к.п.д. в процессе эксплуатации может составлять 1-7 %. Основными причинами ухудшения технического состояния

нагн

етателей являются: эрозия проточной части; увеличение зазоров в уплотнениях покрывающего диска; загрязнение проточной части.

Эрози

я элементов нагнетателя наблюдается в случаях, когда в транспортируемом газе присутствуют механические примеси в количестве, превышающем требованиям ГОСТ.

Эксплуатационный к.п.д. нагнетателя является функцией номинального к.п.д., технического состояния, режима работы и механических потерь в нагнетателе:

$H_{\text{т}} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5$,

где B_1 = 0,95, B_2, B_3 - коэффициенты, учитывающие соответственно техническое состояние, режим работы нагнетателя и механические потери; B_4 - номинальный политропический к.п.д., определяемый техническим уровнем нагнетателя (см. табл. 5.3).

5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВНОГО ГАЗА ДЛЯ ГТУ

Файл скачан с www.turbinist.ru

Расход топливного газа для ГТУ (в тыс. м B_5 /ч) определяют по формуле

B_6, (5.19)

где $H_э = e_1 + e_2 + e_3$ - номинальный расход топливного газа (см. табл. 5.1); e_1 - коэффициент загрузки; e_2 - коэффициент технического состояния ГТУ по топливу (см. табл. 5.3); e_3 - коэффициент, учитывающий отклонение теплоты сгорания топлива от номинала;

- коэффициент, учитывающий параметры атмосферного воздуха (в том числе влияние противообледенительной системы, когда она включена) и степень загрузки.

На основе исследований получена следующая формула для определения коэффициента загрузки:

,

где - коэффициент использования располагаемой мощности.

При поагрегатном расчете расхода топливного газа на многоцеховой КС суммарный расход полностью совпадает с суточным замером. Формула дает очень высокую сходимость результатов.

5.7. НОРМИРОВАНИЕ ЗАТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ЦЕХОВ

Целью нормирования затрат природного газа является наиболее полное и рациональное его использование на КС, определение плановой потребности, а также оценка эффективности его использования на собственные нужды компрессорных цехов.

Основным мет

одом, используемым при разработке норм, является расче

тно-а

налитическнй метод с и

спользованием ка к пас портных ха ракте
ристик, так и опытн о-стати стичес
ких данных о действи тельных затра
тах газа по от дельн ым статьям в раз
личных условиях экспл уа та
ции.

При устан

овлении норм газ а должны быть учтен
расхода
ы следующие те хничес кие, технолог ическ
ие и эксплуатационные факторы:

паспортные (номинальные) характеристики ГТУ и нагнетателей;

поле минусовых допусков на технические показатели ГТУ нагнетателей, предусмотренные техническими условиями и ГОСТ;

техническое состояние ГТУ и нагнетателей по средним статистическим данным в зависимости от времени наработки;

влияние атмосферных и климатических условий на технические показатели агрегата, в том числе и на загрузку ГТУ;

влияние системы противообледенения осевых компрессоров н

а

экономичность работы ГТУ;

Файл скачан с www.turbinist.ru

использование установок утилизации выхлопных газов ГТУ;

поле возможных эксплуатационных режимов работы нагнетателей;

противопомпажное регулирование и возможные перетечки газа в технологических коммуникациях КС;

подогрев топливного газа;

влияние параметров перекачиваемого газа (температуры, давления, состава газа);

статистические данные о показателях надежности ГПА.

Нормативные затраты природного газа на собственные нужды Q (в млн. м w) цеха складываются из затрат на топливный газ z_m и затрат газа на технологические нужды T_m за отчетный (планируемый) период $p_{\text{вх}}$.

Индивидуальные нормы затрат топливного газа

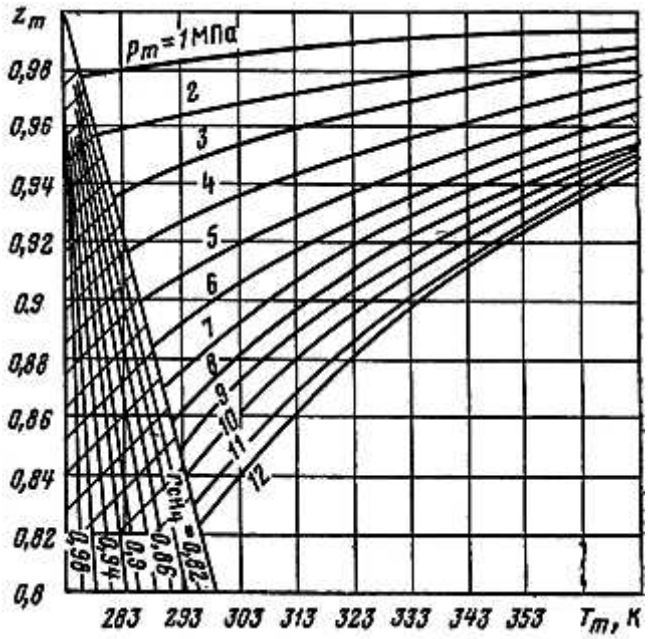
Нормативные затраты топливного газа - это максимально допустимое количество топливного газа, расходуемое на привод ГПА при компримировании запланированного объема транспортируемого газа. Нормирование затрат топливного газа производится на единицу эффективной (полезной) работы сжатия г

аза. Нормативные затрат

ы за отчетн	ый перио	д: $p_{\text{вх}}$ гд	е $p_{\text{вых}}$ - ин	дивидуа	льная	норм	а рас	хода		т	опливного газа;	L - эффекти	вная работ
а	сж	ат	ия	.						Для	оц	енк	и р
аботы сжати я	газа испо ль	зуют полит ро	пическу ю раб	оту сжатия ,	кото рую опре	деляю т по фо	рму ле:	, где	- удел ьная	по лезн ая раб	от	а сжатия , оп	реде ляем ая п

о (5.18); r_{CH_4} - время расчетного периода; - объем газа, перекаченного за период.

Индивидуальные нормы затрат топливного газа , где - коэффициент теплотвор



Файл скачан с www.turbinist.ru

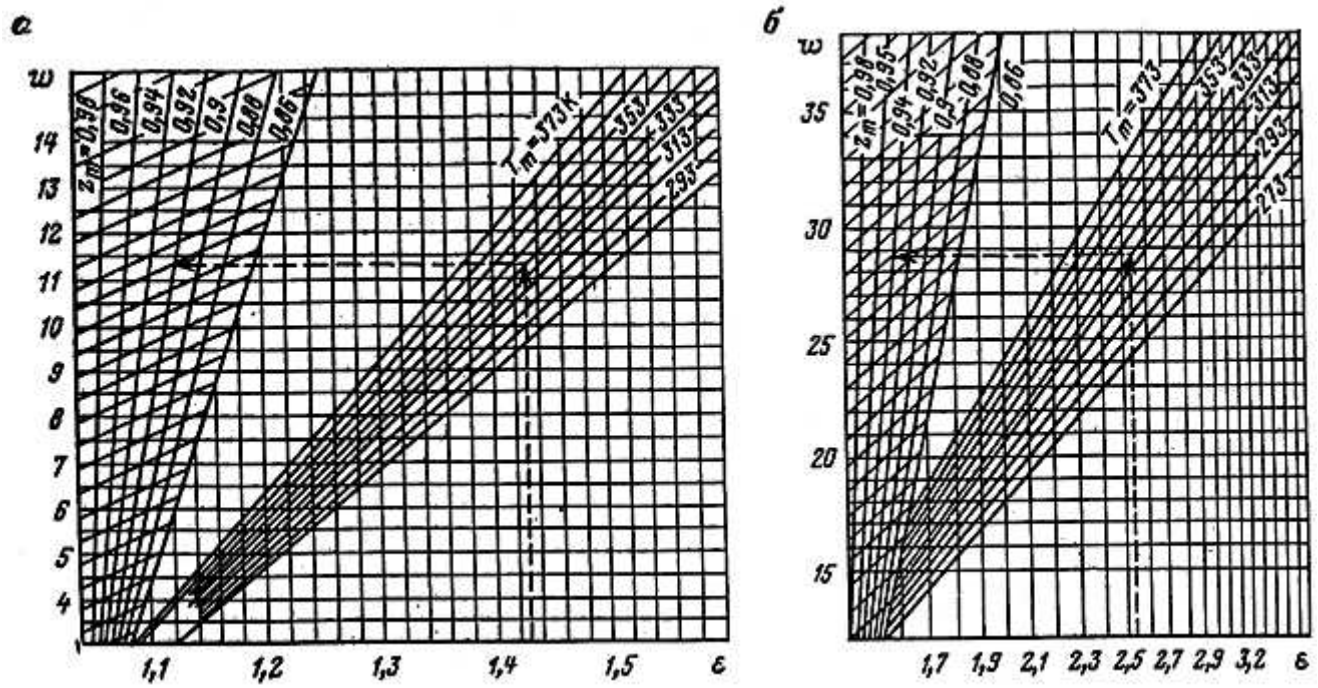
ной способности

природного газа; - коэффициент параметров атмосферного воздуха (тал.5.4.); - коэффициент наработки; - коэффициент трехступенчато

го сжатия транспортируемого газа; - коэффициент влияния утилизаторов выхлопных газов; - исходная индивидуальная норма затрат топливного газа.

Таблица 5.4

Значения коэффициента , учитывающего влияние температуры атмосферного воздуха и загрузки ГПА Тип Расчетная температура атмосф



ерного воздуха , °С

агрегата

+40 +30 +25 +20 +15 +10 +5 0 -5 -10 -15 -20 -25 -30 -40 ГТ-700-4,

ГТ-700-5,

ГТК-5

1,32

1,22 1,18 1,15 1,12 1,09 1,07 1,05 1,03 1,015 1 0,985 0,97 0,96 0,94 ГТ-750-6

1,265 1,195 1,165 1,14 1,12 1,1 1,075 1,06 1,04 1,025 1,01 1 0,98 0,97 0,95 ГТ-6-750, ГТН-6

1,2 1,14 1,11 1,09 1,07 1,05 1,03 1,015 1,0 0,99 0,98 0,97 0,95 0,945 0,93 ГПА-Ц-6,3

1,07 1,06 1,055 1,05 1,045 1,04 1,035 1,03 1,025 1,02 1,015 1,01 1,005 1,0 0,99 ГТН-9-750

1,21 1,145 1,12 1,1 1,075 1,055 1,04 1,02 1,005 0,99 098 0,97 0,96 0,95 0,93 ГТК-10

1,21 1,145 1,12 1,1 1,075 1,055 1,1

1,04*1,0

8 1,065 1,05 1,03 1,02 1,

01 1 0,98 ГПА-10 1,2			1,14 1,115 1,09 1,07		1,05 1,06 --- 1,035* 1			
,04 1,025	1,01 0,99	0,98 0,97	0,9	6 0 ,	94 Г	ТК-1	6, Г	ТН-1
6			1	,1	55	1	,1	1
1,09 1,0	7	1,	05	5	1,	04	1	,0

25 1,

Файл скачан с www.turbinist.ru

01 1,0 0,99 0,98 0,965			0,955 0,95 0,935 ГТН			
-25 1		,1 1,065 1,05 1,	03 1,02 1,005 0,99		0,98 0,97 0,96 0,95 0,94	
0,93 0,	925 0,91 ГТН-10И 1,06		1,045	1,035 1,03 1,02 1,	01 1 1	,005 1,005 1,005 1
,00	5 1	,00	5 1	,00	5 1	,00
5 1,005	"К	об	ер	ра	-	18

2"1,1 1,08

1,07 1,06 1,05 1,04 1,04

1,03*

1,03 1,02 1,015 1

,005 1 0,99 0,98 0,97 ГТН-25И

1,065 1,045 1,035 1,025 1,015 1,01 1 1,005 1,005 1,005 1,005 1,005 1,005 1,005 1,005

_____

* С учетом включения противообледенительной системы при температуре атмосферного воздуха ниже +5°С.

Коэффициент $Б_1$ учитывает эксплуатацию в компрессорных цехах котлов-утилизаторов:

$Б_2$,

где $Б_3$ = 0,025 - коэффициент, учитывающий влияние котла-утилизатора на расход топливного газа; $Б_4$ - число эксплуатируемых котлов-утилизаторов; - число установленных агрегатов.

Исходная индивидуальная норма затрат топливного газа - это максимально допустимое плановое количество топливного

газа на единицу эффективной работы сжатия транспортируемого газа при расчетных условиях работы ГПА. Эту н

орму ц еле соо бра зно оп ред еля ть при сл едующ их усл ов иях: н омин ал ьные а тмос ферные

условия; загрузка ГПА соответствует располагаемой мощности; наработка с начала эксплуатации ГПА

от 0 до 25 ты с.ч. Исх одна я индивидуа льна я но рма зат рат топл ивного газа (в м/(кВт·ч) (та бл. 5.5): , где - и ндив идуальный норм ат ивный к.п.д. ГПА,

$Б_2$.

Таблица 5.5 Исходные индивидуальные нормы затрат топл

ивного газа Тип агрегата $Б_4$, м/кВт·ч , кг у·т/кВт

·ч ГТ-700-4 4 1, 1 ГТ-700-5 0 ,6/0 0,9

,8 0,71 ГТ К-5 0,55/0,73 0, 65 Г

Т-750-6 0,53/0,66 0,62 ГТ-6-750 0,63 0,74 ГТН-6 0,63 0,74 ГПА-Ц-6,3 0,66 0,78 ГТН-9-750

0,75 0,88 ГТК -10

0,5/0,71 0,5 9

Файл скачан с www.turbinist.ru

ГПА-10 0,54 0,64 ГТК-16 0,58 0,68 ГТН-16 0,5 0,59 ГТН-25 0,51 0,6 ГТН-10И 0,56 0,66 "Коберра-182" 0,54 0,64 ГТН-25И 0,52 0,62

_____

Примечание. Для агрегатов ГТ-700-5, ГТК-5, ГТ-750-6, ГТК-10 в знаменателе приведены величины для ГПА, переведенных на безрегенера

тивну

ю схему работы.

Значения коэффициентов для определения индивидуальных норм ГПА приведены в табл. 5.3.

Затраты природного газа на технологические нужды компрессорного цеха и потери

Затраты газа на технологические нужды и потери определяют по формуле: ^{3}, где $p_{\text{вх}}$ - затраты газа на пуски, остановки и изменение режимов работы ГПА

$p_{\text{вых}}$,

$T_{\text{вх}}$ - затраты газа на работу турбодетандера в режиме пуска и в режиме прокрутки (если требуется по инструкции эксплуатации) при остановке ГПА; $T_{\text{вых}}$ - затраты газа на p_m продувку контура нагнетателя при пуске ГПА; T_m - затраты газа на стравливание из контура нагнетателя при остановке ГПА; z - затраты импульсного газа в режиме пуска и остановки ГПА; ε - удельное число пусков - остановок ГПА на единицу календарного времени; w - затраты импульсного газа на управление и силовой привод кранов и на пневматические устройства КИП и А при изменении рабочих режимов ГПА; ^{3} - календарное время; $A_{\text{ГТУ}}$ - число установленных в цехе ГПА; $Б_1$ - технологические затраты газа на эксплуатацию и техническое обслуживание установок и аппаратов; $H_{\text{т}}$ - потери (утечки) газа в коммуникациях цеха.

Работа технологических аппаратов и установок газотурбинных цехов сопровождается затратами газа на их эксплуатацию и техническое обслуживание. Затраты газа на эксплуатацию технологических аппаратов - это затраты на продувку аппаратов и их коллекторов через продувочные и дренажные устройства. Затраты на техническое обслуживание состоят из газа, стравливаемого из аппаратов, установок, коллекторов при их отключении или вскрытии с целью осмотра, очистки, замены фильтрующих элементов или осушающих материалов, десорбционного газа при периодической регенерации осушителей, газа на продувку и настройку предохранительных клапанов и регуляторов. Основные затраты по этой статье (более 90 %) приходятся на продувку пылеуловителей, зависят от кондиционности транспортируемого газа и определяются частотой, продолжительностью, схемой продувок пылеуловителей и параметрами газа на входе в цех.

Затраты газа на продувку определяют расчетным путем по формулам критического истечения газа в атмосферу с учетом имеющихся гидравлических сопротивлений в продувочных линиях. На существующих штатных схемах продувок пылеуловителей критический расход возникает, как правило, на дроссельных шайбах. Расход при этом (в м $e_{\text{э}}$ /с) определяют по формуле

$Б_1$,

где B - диаметр трубы до дроссельной шайбы, м; $Б_3$ - отношение диаметров шайбы и трубы; $Б_1$ - соответственно температура (К), коэффициент сжимаемости, газовая постоянная (Дж/(кмоль·К)), давление (МПа) в пылеуловителе; $Б_3$ - коэффициент гидравлического сопротивления трубы диаметром $B_{\text{эк}}$; $B_{\text{н}}$ - эквивалентная длина участка коллектора до дроссельной шайбы.

Более достоверные величины расхода газа при продувках пылеуловителей могут быть получены методом опрессовки пылеуловителей в станционных условиях. Для этого пылеуловитель отсекают по входу и выходу и выполняют его штатную продувку. Средний секундный расход определяют по приближенному выражению (в м $E_{\text{н}} = e_{\text{э}} A_{\text{ГТУ}}$ /с)

Файл скачан с www.turbinist.ru

3,

где $p_{вх}$ - геометрический объем пылеуловителей, м $p_{вых}$; $T_{вх}$ - падение давления газа в пылеуловителе, МПа; - температура газа

Переход в начало документа осуществляется по ссылке

Переход к предыдущей части документа осуществляется по ссылке

Раздел девятый

НАЛАДКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ

9.1. Основные технические данные защит серии ДФЗ

В дифференциально-фазных защитах линий 110-500 кВ используются в настоящее время панели заводского изготовления типа ДФЗ-201, ДФЗ-504 и ДФЗ-503.

Проверка реле переменного тока, напряжения и реле постоянного тока релейной части защит особенностей не имеет и изложена в разд. 2.

Основные технические данные релейной части приведены в табл. 9.1, принципиальные схемы - на рис. 9.1, 9.2.

Таблица 9.1. Основные технические данные релейной части панелей дифференциально-фазной защиты типов ДФЗ-201, ДФЗ-504 и ДФЗ-503

Технические данные	ДФЗ-201	ДФЗ-504	ДФЗ-503
Номинальный переменный ток, А	1 или 5	1 или 5	1 или 5
Номинальное напряжение, В			
переменное	100	100	100
постоянное	110 или 220	220	220
Время действия защиты, с	Не более 0,05	Не более 0,05	Не более 0,05
Устройство фильтра-реле пускового органа:			
уставки по току обратной последовательности $I_{2уст}$, А	1; 1,5; 2 (для $I_{ном}$ = 5 А)	0,1; 0,15; 0,2 (для $I_{ном}$ = 1 А)	-
уставки по напряжению обратной последовательности $U_{2уст}$, В	-	-	5, 6, 7
уставки по току нулевой	1; 1,5; 2	0,3; 0,4; 0,5	0,3; 0,4;

Файл скачан с www.turbinist.ru

последовательности $3I_{0уст}$, А	(для $I_{ном}$ = 5 А)	(для $I_{ном}$ = 1 А)	0,5 (для $I_{ном}$ = 1 А)
уставки устройства компенсации $Z_{2к}$, Ом	-	-	36, ступени 3%
Реле сопротивления:			
минимальная уставка, Ом/фазу	3,5 (для $I_{ном}$ = 5 А)	30 (для $I_{ном}$ = 1 А)	30 (для $I_{ном}$ = 1 А)
максимальная уставка, Ом/фазу	35 (для $I_{ном}$ = 1 А)	300 (для $I_{ном}$ = 1 А)	300 (для $I_{ном}$ = 1 А)
Реле сопротивления:			
угол максимальной чувствительности, град	70 ± 5	83 ± 5	83 ± 5
ток точной работы, А, не более	2,8 (для $I_{ном}$ = 5 А)	0,15 (для $I_{ном}$ = 1 А)	0,15 (для $I_{ном}$ = 1 А)
ток срабатывания реле при $U_р$ =0, А, не более	3,5 (для $I_{ном}$ = 5 А)	0,3 (для $I_{ном}$ = 1 А)	0,3 (для $I_{ном}$ = 1 А)
Орган манипуляции:			
коэффициент фильтра манипуляции k	4, 6, 8	6, 8, 10	6, 8, 10
напряжение на выходе при токе прямой последовательности, В	8 при k = 8 и I = 2А (для $I_{ном}$ = 5 А)	4,58 при k = 10 и I = 0,3 А (для $I_{ном}$ = 1 А)	4,58 при k = 10 и I = 0,3 А (для $I_{ном}$ = 1 А)
Орган манипуляции:			
угол между током и напряжением	17° при k = 8 и I_{bc} =0,6 $I_н$	42° при k = 10 и I_{bc} =0,5 $I_{ном}$	95° при k = 10 и I_{ao} =0,3А
уставка устройства компенсации емкостных токов $y_к$, 1/Ом	-	-	$5000 \cdot 10^{-6}$, ступени регулирования 3%
уставка по углу блокировки органа сравнения фаз токов, град.	$\pm 45, \pm 52, \pm 60$	$\pm 50, \pm 57, \pm 65$	$\pm 50, \pm 57, \pm 65$

Файл скачан с www.turbinist.ru

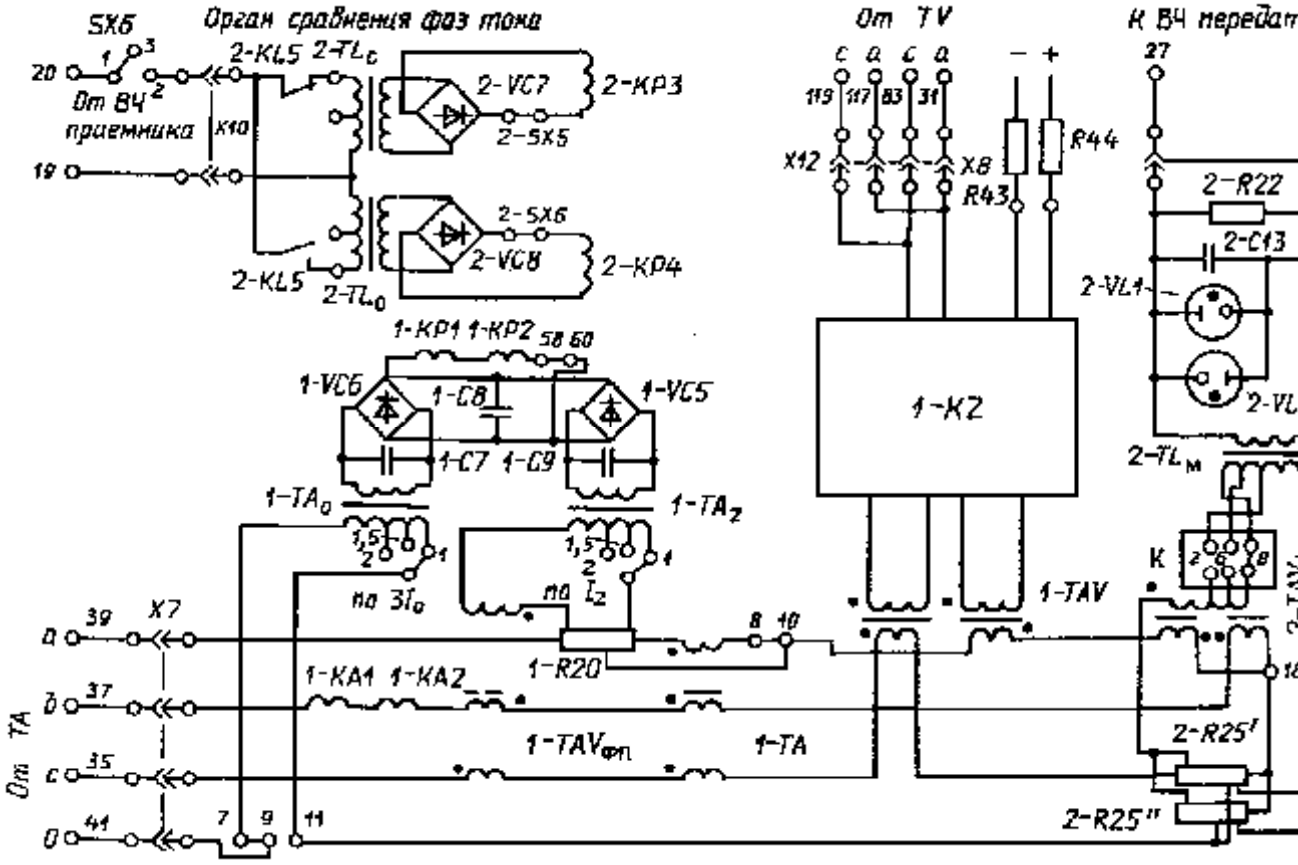


Рис. 9.1. Принципиальная схема панели дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ-201

Файл скачан с www.turbinist.ru

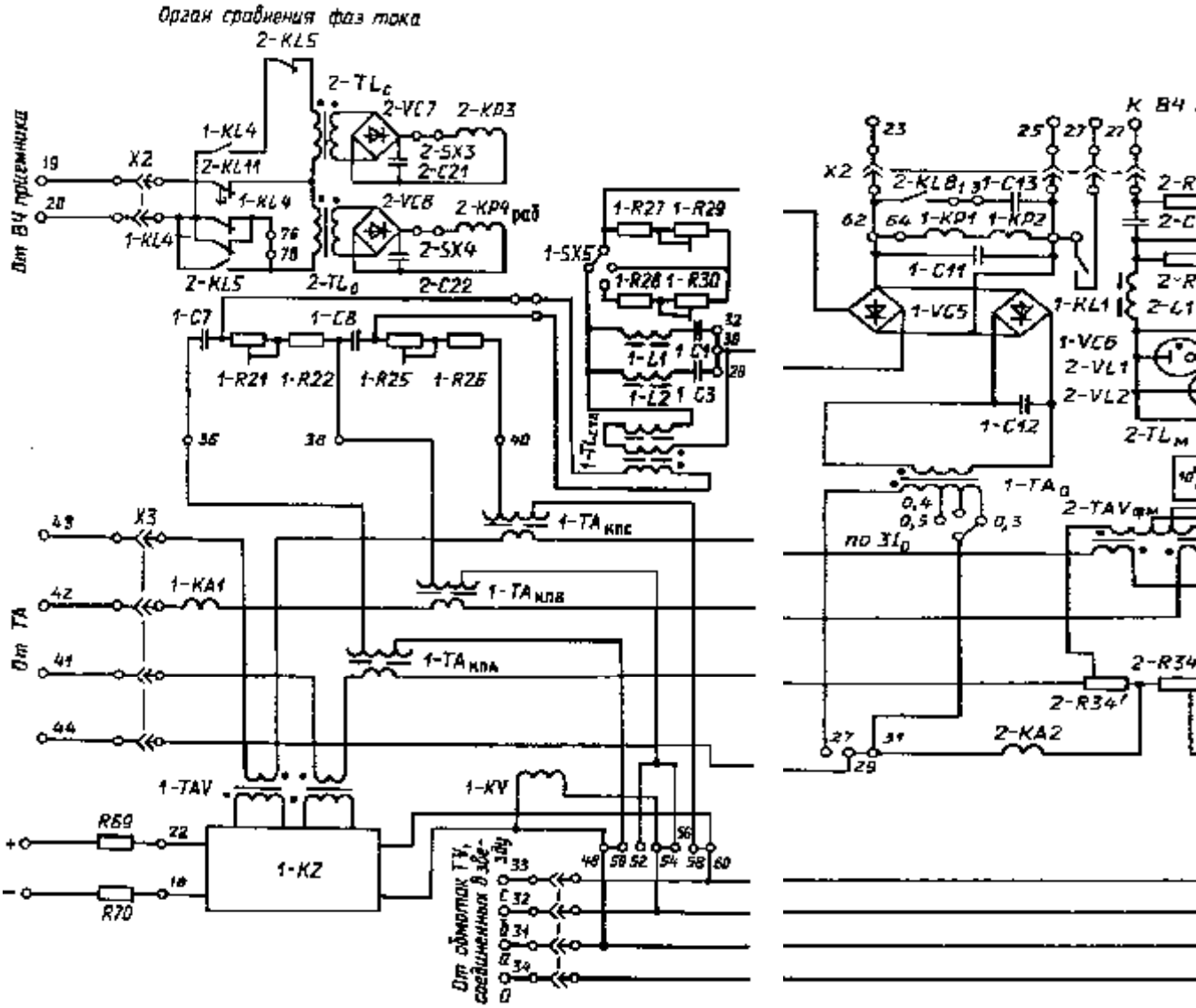


Рис. 9.2. Принципиальная схема панели дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ-503

В разделе приняты обозначения отдельных реле, аппаратов и комплектов аппаратов, соответствующие заводским обозначениям, принципиальным схемам и ГОСТ. Индекс, стоящий перед обозначением элементов, указывает на принадлежность к определенному комплекту аппаратов. Например, на рис. 9.1 реле 1-КА2 означает, что токовое реле КА2 установлено в комплекте аппаратов 1.

9.2. Проверка и настройка пусковых органов

В пусковых органах дифференциально-фазных защит используются:

при трехфазных КЗ - реле сопротивления, реле напряжения и реле тока (для фиксации);

при несимметричных КЗ - поляризованные реле, включенные на выходе фильтров тока или напряжения обратной последовательности.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Для повышения чувствительности при однофазных КЗ дополнительно используется составляющая тока КЗ нулевой последовательности. На протяженных линиях для повышения чувствительности пускового органа напряжения обратной последовательности используется компенсация по $Z_{2к}$ (только в защите типа ДЗ-503).

В объем проверки индукционного реле полного сопротивления входит:

проверка механической части;

проверка самохода от напряжения и зоны действия в режиме работы реле направления мощности;

проверка угловой характеристики $Z_{ср}=f(\varphi)$ и настройка рабочей уставки при заданном токе;

проверка зависимости сопротивления срабатывания от тока при угле максимальной чувствительности, определение тока точной работы (описано в разд. 8);

проверка отсутствия вибрации контактов реле.

Проверка механической части, самохода от напряжения и зоны работы в режиме направления мощности производится аналогично проверке реле мощности (см. § 2.6). Проверка производится при расчетных уставках. Уставка автотрансформатора подсчитывается по формуле

$$n = \frac{Z_{min}}{Z_{уст}} 100.$$

Угловая характеристика $Z_{ср}= f(\varphi)$ проверяется при заданном токе. При угле максимальной чувствительности, определенном при проверке зоны работы в режиме реле направления мощности, плавно снижая напряжение со 100 В, измеряют напряжение срабатывания реле $U_{ср}$ и по формуле $Z_{ср}=U_{ср}/2I$ определяют сопротивление срабатывания реле в омах на фазу. Если полученное $Z_{ср}$ отличается от заданного, следует изменить в ту или другую сторону положения штырей контактных разъемов на доске выводов автотрансформатора. Коэффициент возврата, определяемый по напряжению возврата $U_{в}$, должен быть не менее 1,1. Затем снимается угловая характеристика реле через каждые 30° и проверяется зависимость $Z_{ср} = f(I)$. При больших токах сопротивление срабатывания не должно отличаться от измеренного при заданном токе более чем на 10 %. Из снятой характеристики определяется ток точной работы реле - минимальный ток, при котором сопротивление срабатывания на 15 % меньше сопротивления срабатывания, измеренного при номинальном токе, и полученное значение сравнивается с паспортными данными 0,15 А (допускается отклонение $\pm$ 7%). Если у реле сопротивления используется смещение характеристики в III квадрант (обычный вариант), то дополнительно определяется ток срабатывания реле при неисправностях в цепях напряжения (обрыв и закорачивание). Полученные значения тока (которые не должны превышать 3,5 А) позволяют оценить надежность блокирования пуска защиты в указанных случаях. Если смещение не используется (при использовании защиты на линиях с ответвлениями), то вместо определения тока срабатывания реле проверяется поведение реле при сбросе напряжения, подводимого к реле, со 100 В до нуля с одновременным закорачиванием цепей напряжения накоротко в диапазоне токов от номинального до 7 $I_{ном}$ при предварительном угле $\varphi = \varphi_{мч} + 180°$ (токи подаются толчком). Реле не должно срабатывать.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Работа контактной системы реле проверяется при изменении сопротивления срабатывания реле от 0,1 до 0,9 $Z_{ср}$ при токах 0,7-3 $I_{ном}$.

Проверка фильтров тока и напряжения обратной последовательности и пусковых реле производится согласно указаниям соответствующих параграфов разд. 6. При использовании в защите пуска по току 3 I_0 дополнительно проверяется чувствительность пускового органа при совместном пуске по I_2 (U_2) и 3 I_0.

При использовании в защите основного пуска по I_2 проверка проводится при подведении к панели тока $I_{с0}$ на рабочих уставках. Ток срабатывания отключающего реле не должен отличаться более чем на $\pm$ 15% от заводских данных. При больших отличиях проверяется исправность трансформатора 1-ТА$_0$ и выпрямительного моста.

При использовании в защите основного пуска по U_2 сначала проверяется ток срабатывания отключающего реле при подведении к панели только тока $I_{а0}$, затем при одновременной подаче на панель $U_{2ср}$ и 3 $I_{0ср}$ измеряется ток в обмотке отключающего реле, который должен примерно в 1,5 раза превышать $I_{ср}$ реле (с точностью $\pm$ 20%).

У защиты типа ДФЗ-503 дополнительно проверяются частотные фильтры третьей и пятой гармоник и устройство компенсации (уставка ТА$_{кп}$ равна 50 %). Настройка частотных фильтров проверяется при подаче на выводы 24-26 комплекта 1 (см. рис. 9.2) напряжения от генератора звуковой частоты достаточной мощности (цепи напряжения звезды закорочены на входе панели) и измерении напряжения срабатывания реле 1-КР2 на частотах 150 и 250 Гц, чем определяется степень загрубления защиты. Загрубление пускового органа от третьей гармоники (150 Гц) должно быть не менее 3,5, а от пятой гармоники (250 Гц) - не менее 6. Принятая в защите схема включения фильтров третьей и пятой гармоник обеспечивает ослабление влияния не только этих, но также всех гармонических составляющих более высокого порядка, включая 13-ю, наличие которой в нормальном режиме выявлено на некоторых линиях 500 кВ. При необходимости производится подрегулировка фильтров изменением воздушного зазора дросселей.

Проверка устройства компенсации заключается в проверке сопротивления компенсации и в правильности включения трансформаторов компенсации. Проверка сопротивления компенсации $Z_{2к}$ производится при токе 1 А, поочередно подаваемом на вход панели на фазы А0, В0 и С0, при холостом ходе трансформаторов компенсации ТА$_{кп}$. Сопротивление компенсации подсчитывается по формуле

$$Z_{2к} = U/I,$$

где U - напряжение, измеренное на вторичной обмотке трансформатора ТА$_{кп}$.

При отличии измеренного сопротивления $Z_{2к}$ от заданного более чем на $\pm$ 0,5 Ом производится его регулировка винтами на соответствующей регулировочной доске трансформатора компенсации ТА$_{кп}$.

Проверка правильности включения трансформаторов компенсации ТА$_{кп}$ производится при имитации двухфазных КЗ “за спиной”. Цепи напряжения защиты питаются от фазорегулятора. При токе I= 1 А, напряжении U = $\sqrt{3}$ I $Z_{2к}$ и угле между током и напряжением, равном нулю, ток в обмотках поляризованных реле пускового органа должен быть близок к нулю (обычно не более 0,1 мА). Векторные диаграммы, поясняющие проверку правильности включения

Файл скачан с www.turbinist.ru

трансформаторов компенсации $ТА_{кп}$ при имитации КЗ между фазами В и С, приведены на рис. 9.3.

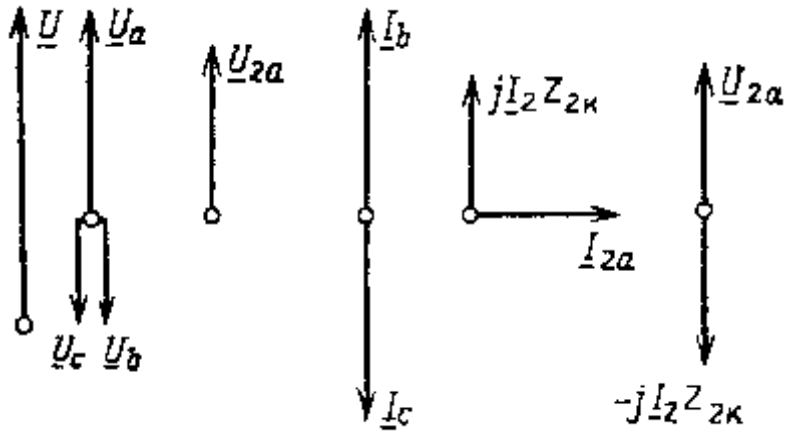


Рис. 9.3. Векторные диаграммы, поясняющие проверку правильности включения трансформаторов компенсации ТА при имитации КЗ между фазами В и С защиты типа ДФЗ 503

При использовании в пусковом органе защиты пуска по току обратной последовательности [на линиях сравнительно небольшой протяженности, где по условиям работы с устройством однофазного повторного включения (ОАПВ) необходимо обеспечить компенсацию емкостных токов линии в органе манипуляции] вторичные обмотки трансформаторов компенсации $ТА_{кп}$ перемычками отсоединяются от цепей напряжения и отсоединенные зажимы их соединяются в звезду. При такой схеме ток $I_{2ср}$, соответствующий срабатыванию реле 1-КР2, зависит от уставок $U_{2ср}$ по напряжению обратной последовательности и по сопротивлению компенсации ($I_{2ср} = U_{2ср} / Z_{2к}$). При минимальной уставке по $U_{2ср}$ = 5 В и максимальной уставке по $Z_{2к}$ = 36 Ом ток срабатывания обратной последовательности $I_{2ср}$ будет составлять примерно 0,14 А.

Проверка пускового органа защиты завершается проверкой действия безынерционного пуска ВЧ передатчика. Перед проверкой на защиту и приемопередатчик подается постоянный ток, на вход ВЧ приемопередатчика подключается электронный осциллограф: цепи контактного пуска и цепи манипуляции отсоединяются и цепи манипуляции закорачиваются в сторону приемопередатчика.

При имитации двухфазного КЗ измеряются напряжения (ток) обратной последовательности при появлении на экране электронного осциллографа ВЧ импульсов и при появлении непрерывного ВЧ сигнала. Напряжение (тока) обратной последовательности при появлении ВЧ импульсов должно быть больше $U_{2ср}$ ($I_{2ср}$) чувствительного исполнительного реле пускового органа, а при появлении непрерывного сигнала - меньше $U_{2ср}$ ($I_{2ср}$) более грубого исполнительного реле. Интервал между появлением ВЧ импульсов и непрерывного ВЧ сигнала обычно не превышает 10 % напряжения (тока) срабатывания обратной последовательности. Замедление снятия безынерционного пуска оценивается по задержке исчезновения ВЧ сигнала на экране электронного осциллографа после отключения переменного напряжения (тока) от панели.

9.3. Проверка и настройка органа манипуляции

Файл скачан с www.turbinist.ru

В объем проверки органа манипуляции входит:

проверка действия стабилизаторов напряжения;

измерение сопротивлений элементов схемы органа манипуляции;

проверка настройки комбинированного фильтра токов;

проверка устройства компенсации емкостных токов линий;

проверка чувствительности органа манипуляции к различным видам КЗ;

проверка зависимости угла между напряжением манипуляции и током на входе панели от тока.

Проверка действия стабилизаторов напряжения производится при подаче на вход панели тока I_{bc}. При проверке определяется ток I_{bc}, при котором зажигается каждый из стабилизаторов напряжения (при снятом другом из панельки). Момент зажигания определяется по электронному осциллографу, подключенному на выход органа манипуляции, по изменению формы одной из полуволн кривой напряжения (срезается верхушка синусоиды). Дополнительно контролируется напряжение на стабилитронах в момент зажигания вольтметром переменного тока с малым потреблением. При совместной работе обоих стабилитронов проверяется правильность включения их по полярности (должно быть встречное включение) при увеличении тока до 5 $I_{ном}$. При правильной полярности включения будут ограничиваться обе полуволны кривой напряжения и у обоих стабилитронов будет четко видно свечение; напряжение при этом не должно превышать 180 В.

Измерение сопротивлений элементов схемы органа манипуляции производится только у защит ДФЗ-503 и ДФЗ-504, имеющих частотные фильтры; у защиты ДФЗ-201 проверяется только сопротивление нагрузки фильтра. Проверка производится при подаче на входные зажимы панели защиты тока $I_{bc} = 0{,}5\ I_{ном}$ поочередным измерением тока (миллиамперметром переменного тока с малым потреблением - обычно прибором ВАФ-85) в элементах фильтра и падения напряжения на них (вольтметром прибора ВАФ-85). Сопротивление элементов фильтра и сопротивление всей нагрузки фильтра должны соответствовать заводским данным.

Проверка настройки комбинированного фильтра токов $I_1 + kI_2$. Для оценки правильности настройки фильтра определяется коэффициент k фильтра и проверяется соотношение между плечами рабочего сопротивления фильтра. Коэффициент k проверяется при подключенной нагрузке фильтра (у защиты ДФЗ-503 с устройством компенсации емкостных токов) на заданных уставках. На панель подается ток I_{bc}, равный 0,5-0,6 $I_{ном}$, при этом токе измеряется ток, проходящий в нагрузке фильтра. Затем на панель подается такой ток I_{ab}, при котором миллиамперметр, измеряющий ток в нагрузке фильтра, будет показывать то же значение. По формуле $k = \dfrac{\sqrt{3}I_{bc} + I_{ab}}{\sqrt{3}I_{bc} - I_{ab}}$ определяется значение коэффициента фильтра.

Для повышения точности измерения повторяются 3 раза при различных значениях тока и определяется среднее значение, которое не должно отличаться от заданного более чем на ± 8 %.

При необходимости производится регулировка фильтра. Перед регулировкой проверяется правильность соотношения между плечами сопротивления фильтра (резистор отсоединяется от фильтра снятием перемычки) путем измерения падения напряжения на рабочей части резистора при подаче тока на вход панели в фазы АВ или СА. Для повышения точности отсчета устанавливается такой ток, чтобы стрелка вольтметра, подключенного на всю рабочую часть резистора, отклонялась примерно на всю шкалу и показывала напряжение, кратное трем (например, 0,9 или 9 В). Затем, не изменяя тока на входе панели, один из проводов от вольтметра переносят на провод между двумя сопротивлениями фильтра. Вольтметр должен

Файл скачан с www.turbinist.ru

показать при правильной установке регулировочных хомутиков 2/3 ранее измеренной величины. В случае отклонения от этого соотношения производится регулировка изменением положения одного из хомутиков, причем если коэффициент k был меньше требуемого, то общее сопротивление фильтра надо уменьшить, и наоборот. После регулировки соотношения между плечами сопротивления фильтра снова определяется коэффициент фильтра.

По этой же схеме проверяется стабильность коэффициента фильтра при изменении тока на входе панели во всем диапазоне, гарантируемом заводом-изготовителем. Коэффициент k фильтра не должен отличаться от измеренного при $I_{bc} = 0{,}5 \div 0{,}6\ I_{ном}$ более чем на $\pm$ 20%.

Проверка устройства компенсации емкостных токов линии. Устройство является комбинированным фильтром напряжения $U_1 + kU_2$, у которого ЭДС на входе фильтра зависит от значения емкостного тока линии. На устройстве устанавливаются заданные значения коэффициентов k и $y_к$. Переход к вторичным значениям производится по формуле

$$y_{к(втор)} = y_{к(перв)} \frac{K_U}{K_I}.$$

Расчет используемых вторичных витков трансреактора $2\text{-}TL_{км}$ (см. рис. 9.2) для заданного значения проводимости и устройства производится по формуле, %,

$$n = 100 \frac{y_{к.задан}}{y_{кmax}}.$$

На зажимы В-С цепей напряжения панели защиты подается напряжение U_{bc}=100 В. При закороченных зажимах А, В, 0 электронным вольтметром измеряется напряжение $U_м$ на выходе органа манипуляции. После отключения напряжения U_{bc} на зажимы В-С цепей тока панели защиты подается ток I_{bc} такого значения, при котором напряжение $U_м$ на выходе органа манипуляции в точности равно напряжению при подведении к защите напряжения U_{bc}. Затем на панель, не изменяя схемы и полярностей включения, одновременно подают напряжение U_{bc} и ток I_{bc}, опережающий напряжение на угол 90°. Напряжение манипуляции $U_м$ на выходе органа при этом должно быть близким к нулю.

При изменении в небольших пределах подаваемых на панель напряжения U_{bc}, тока I_{bc} и угла φ между ними добиваются минимального значения напряжения $U_м$. При этих условиях угол φ будет равен углу проводимости компенсирующего устройства, значение которого должно быть в пределах 86-88°. Проводимость, 1/Ом, для этого случая подсчитывается по формуле

$$y_к^{(bc)} = 2 \frac{I_{bc}}{U_{bc}}.$$

В случае отличия проводимости $y_к^{(bc)}$ от заданного значения $y_к$ изменяется положение накладок на регулировочной доске трансреактора $2\text{-}TL_{км}$ (ступень регулировки - около 3% максимального значения $y_к$).

Файл скачан с www.turbinist.ru

Аналогично определяется проводимость компенсирующего устройства при подаче на панель напряжения U_{a0} = 60 В (при закороченных зажимах А, В, С) и тока I_{a0}. Проводимость, 1/Ом, в этом случае подсчитывается по формуле

$$y_{к}^{(a0)} = \frac{2}{3}\frac{I_{a0}}{U_{a0}}.$$

Если проводимость $y_{к}^{(a0)}$ не равна проводимости $y_{к}^{(bc)}$, это значит, что коэффициент k фильтра $U_1 + kU_2$ отличается от коэффициента k фильтра $I_1 + kI_2$. Для подрегулировки настройки фильтра $U_1 + kU_2$ на защиту снова подают напряжение U_{a0} = 60 В и ток $I_{a0} = \frac{3}{2} U_{a0} y_{к}^{(bc)}$ (ток опережает напряжение на угол φ) и, регулируя сопротивление в цепи обмотки трансреактора 2-$TL_{км}$. (см. рис. 9.2), включенной на напряжение U_{a0}, устанавливают минимум напряжения небаланса.

При неправильной полярности включения компенсирующего устройства по отношению к комбинированному фильтру токов напряжение $U_{м}$ на выходе органа манипуляции при питании защиты одновременно напряжением и током (по соответствующим схемам) не будет равно нулю, а будет превышать в 2 раза напряжение $U_{м}$ при питании только одним напряжением или током.

Правильность полярности включения обмотки трансформатора 2-$TL_{км}$ на напряжение 3 U_0, проверяется при одновременной подаче на панель защиты напряжения U_{a0} = 20 В (зажимы А, В, С закорочены) и напряжения $U_{a_H c_K}$, равного по величине $U_0 = 3\sqrt{3}\ U_a$ = 104 В. При таких значениях подводимых напряжений и строгом соблюдении полярности их включения напряжение $U_{м}$ на выходе органа манипуляции должно быть равно нулю. При необходимости производится подрегулировка устройства изменением сопротивления переменного резистора в цепи обмотки 3 U_0. При правильном включении обмоток по полярности при одновременной подаче на панель указанных выше напряжений напряжение $U_{м}$ на выходе органа будет в 2 раза больше, чем при подаче только одного из этих напряжений. Окончательно правильность полярности включения обмоток ω_{bc} и ω_{a0} проверяется при проверке защиты под рабочим током и напряжением.

Проверка чувствительности органа манипуляции к различным видам КЗ производится при имитации всех видов двухфазных и однофазных КЗ при токе 0,4-0,5 $I_{ном}$. Приемопередатчик в начале проверки отсоединяется от органа манипуляции. Напряжение на выходе органа манипуляции контролируется вольтметром переменного тока с малым потреблением (можно использовать вольтметр прибора ВАФ-85). Напряжение на выходе органа манипуляции при симметричном трехфазном токе прямой последовательности подсчитывается по формулам

$$U_{м}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}U_{bc}}{k-1} \quad \text{и} \quad U_{м}^{(3)} = \frac{3U_{a0}}{k+1}.$$

Оба значения должны быть примерно равны и соответствовать данным завода-изготовителя. При одной из проверок подключается к защите приемопередатчик и определяется, насколько снижается напряжение на выходе органа манипуляции за счет подключения дополнительной нагрузки. Напряжение не должно снижаться больше чем на 10 %. При большем снижении

Файл скачан с www.turbinist.ru

напряжения проверяются сопротивления резисторов манипуляторной лампы приемопередатчика.

Проверка зависимости угла между напряжением манипуляции и током на входе панели. Для защиты ДФЗ-201 угол измеряется при подаче на вход панели тока I_{bc} = 3 А, для защит ДФЗ-503 и ДФЗ-504 - соответственно тока I_{a0} = 0,5 А. Угол, ток и напряжение определяются прибором ВАФ-85 (рис. 9.4). По этой же схеме проверяется стабильность угла при изменении тока на входе панели от 0,3 $I_{ном}$ до 5 $I_{ном}$. Значение угла и его стабильность должны соответствовать заводским данным, при несоответствии проверяют все элементы органа манипуляции.

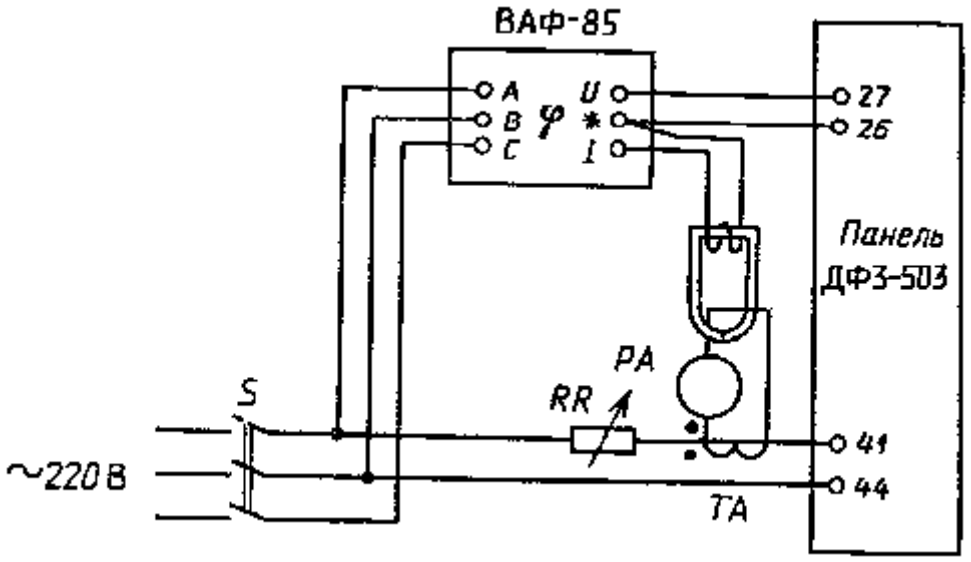


Рис. 9.4. Схема измерения угла между током I_{a0} на входе панели и напряжением на выходе органа манипуляции защиты типа ДФЗ-503

Полученные значения углов сравниваются с аналогичными углами на другом конце линии. При одинаковых токах при различии углов более 10° производится перерегулировка органов манипуляции на одном или обоих полукомплектах защиты.

9.4. Проверка и настройка органа сравнения фаз

При проверке определяется зависимость длительности импульсов тока на выходе приемника от напряжения манипуляции. Приемопередатчик подключается к панели защиты, и на него подается номинальное напряжение постоянного тока. В органе сравнения фаз подключается отключающее реле. Напряжение манипуляции измеряется вольтметром переменного тока с малым потреблением (ВАФ-85), включенным на выходе органа манипуляции. Ток приема измеряется по контрольному миллиамперметру магнитоэлектрической системы. Изменяя ток I_{bc}, подаваемый на панель, что вызывает изменение $U_м$, снимают характеристику $\gamma = f(U_м)$.

Длительность импульсов, град, подсчитывается по формуле

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\gamma = 360\ I_{пр}/I_{пок},$$

где $I_{пр}$ - ток приема при работающем передатчике; $I_{пок}$ - ток покоя.

Характеристика снимается до $U_м$ = 100 В. Из построения характеристики определяется точка, при которой длительность импульсов на 15° меньше, чем при $U_м$ = 100 В. Соответствующее этой точке напряжение манипуляции условно называется напряжением полной манипуляции. При правильной настройке приемопередатчика длительность импульсов при $U_м$ = 100 В составляет 130-160°, а напряжение полной манипуляции 3-12 В (для УПЗ-70).

Для ориентировочного определения минимального тока нагрузки, при котором возможен обмен ВЧ импульсами, дополнительно измеряется ток па входе панели I_{bc}, при котором срабатывает сигнальное реле органа сравнения фаз. Ток нагрузки, А, подсчитывается по формуле

$$I_{нагр min} = I_{bc ср}\ \frac{k-1}{\sqrt{3}}\ K_{TA},$$

где K_{TA} - коэффициент трансформации тока защищаемого присоединения; k - коэффициент фильтра органа манипуляции при малых токах.

9.5. Проверка блокировки при неисправностях цепей напряжения защиты типа ДФЗ-503

В объем проверки блокировки входит:

проверка правильности включения по полярности и настройка на минимум небаланса;

проверка чувствительности блокировки;

проверка тока срабатывания и возврата исполнительного реле.

Проверка правильности включения по полярности и настройки на минимум небаланса производится отдельно для каждой фазы цепей напряжения (каждого трансформатора $2\text{-}TL_Б$, см. рис. 9.2). Одновременно к цепям напряжения звезды и разомкнутого треугольника каждой фазы подводятся однополярные номинальные напряжения (соответственно $100/\sqrt{3}$ и 100 В) и измеряется ток небаланса в обмотке исполнительного реле 2-КР5 миллиамперметром магнитоэлектрической системы с малым потреблением. Ток небаланса не должен превышать 0,3 мА. Во избежание прохождения тока через обходные цепи свободные зажимы других фаз закорачиваются и соединяются с нулевым зажимом цепей напряжения. Для исключения влияния угловых погрешностей подачу напряжений на схему производят от регулировочных автотрансформаторов или потенциометров с малым активным сопротивлением. Если измеренный ток небаланса превышает 0,3 мА, то производится регулировка на минимум небаланса изменением переменных сопротивлений в цепях обмоток звезды.

Чувствительность блокировки проверяется по такой же схеме при пофазном снижении напряжения, подводимого к обмоткам блокировки (подключаемым к комплекту “звезда”). Исполнительное реле блокировки 2-КР5 (см. рис. 9.2) должно срабатывать при снижении напряжения на $7{,}5 \pm 0{,}75$ В.

Файл скачан с www.turbinist.ru

В заключение производится проверка тока срабатывания и возврата исполнительного реле и определяется четкость работы его контактной системы при поданном на панель постоянном токе. Ток срабатывания должен быть в пределах 1,5-1,8 мА, коэффициент возврата - не менее 0,4.

9.6. Комплексная проверка защиты

Комплексная проверка защиты является завершающей проверкой при питании защиты от постороннего источника. Комплексная проверка состоит из проверки взаимодействия реле; проверки защиты имитацией КЗ; проверки действия защиты на отключение выключателей, на световые и звуковые сигналы.

Проверка защиты имитацией КЗ производится совместно с приемопередатчиком при напряжении постоянного тока, пониженном до 0,8 $U_{ном}$. Проверка производится по принципиальной схеме цепей постоянного тока защит. Реле при проверке переключаются вручную. Исправность цепей накала ламп приемопередатчика проверяется при поочередном извлечении из панелей по одной лампе каждой параллельной ветви цепи накала (для УПЗ-70).

Проверка защиты имитаций КЗ производится совместно с приемопередатчиком при номинальном напряжении постоянного тока в следующем объеме:

а) проверяется согласование полярностей включения реле сопротивления, компенсирующего устройства пускового органа и устройства емкостной компенсации обратной последовательности органа управления ВЧ передатчиком (проверка производится только для защиты типа ДФЗ-503);

б) проверяется поведение выходного реле органа сравнения фаз (реле 2-КР4 защит ДФЗ-201 и ДФЗ-504, реле 2-КР4 защиты ДФЗ-503) при КЗ вне защищаемой зоны;

в) проверяется время срабатывания защиты при КЗ в защищаемой зоне.

Проверка согласования полярности производится по схеме, приведенной на рис. 9.5, при имитации КЗ на фазах АВ (рис. 9.6, а). Реле сопротивления 1-KZ (см. рис. 9.1) переводится в режим работа органа направления мощности. При напряжении U= 100 В и токе I= 0,1 ÷ 0,15 А реле должно сработать. Векторная диаграмма в этом режиме приведена на рис. 9.6, б.

Файл скачан с www.turbinist.ru

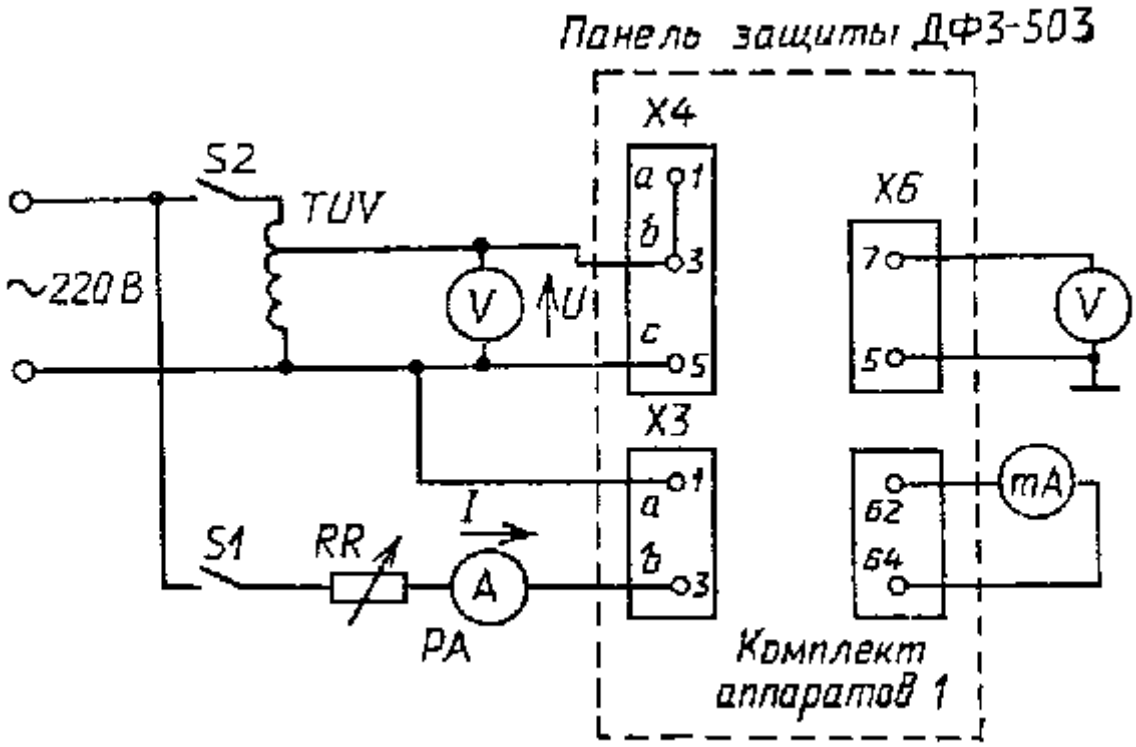


Рис. 9.5. Схема проверки согласования полярностей включения реле сопротивления, компенсирующего устройства пускового органа и устройства емкостной компенсации обратной последовательности органа управления ВЧ передатчиком защиты типа ДФЗ-503

После этого проверяется правильность включения трансформаторов компенсации пускового органа 1-ТА$_{кп}$ при I= 0,5 А и U=$\sqrt{3}$ IZ$_{2к}$. При одновременной подаче тока и напряжения на защиту ток в реле 1-КР1 и 1-КР2 пускового органа должен быть близок к нулю. Векторные диаграммы для этого режима приведены на рис. 9.6, в. Затем проверяется правильность включения устройства компенсации емкостных токов органа манипуляции. При подаче тока I = 0,05 А (напряжение отключено) электронным вольтметром измеряется напряжение на выходе органа манипуляции. При отключенном токе включается напряжение и увеличивается до тех пор, пока электронный вольтметр, включенный на выходе органа манипуляции, не покажет значение, которое было при подаче одного тока I = 0,05 А. При одновременной подаче тока и напряжения (значения не меняются) электронный вольтметр на выходе органа манипуляции должен показать примерно удвоенное значение при раздельной подаче тока и напряжения. Векторные диаграммы для этого режима приведены на рис. 9.6, г.

Файл скачан с www.turbinist.ru

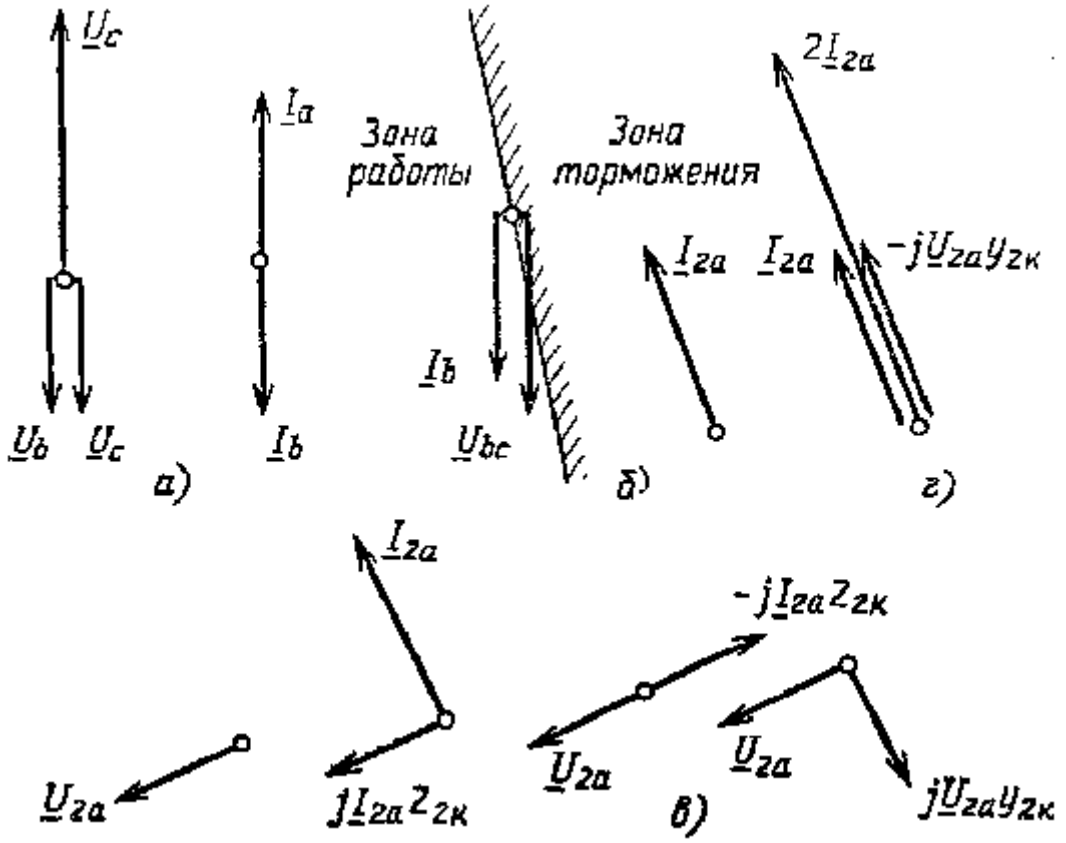


Рис. 9.6. Векторные диаграммы, поясняющие проверку согласования полярностей включения реле сопротивления, компенсирующих устройств пускового органа и устройства компенсации обратной последовательности органа управления ВЧ передатчиком защиты типа ДФЗ-503

а - токи и напряжения, подводимые к защите при проверке; б - проверка реле сопротивления, в - проверка компенсирующего устройства пускового органа; г - проверка устройства компенсации емкостных токов обратной последовательности органа управления; $U_{2a} = (1/3)(U_a + a^2 U_b + a U_c)$; $I_{2a} = (1/3)(I_a + a^2 I_b + a I_c)$

$$U_{2a} - iI_{2a} Z_{2к} = 0; \quad I_{2a} - i U_{2к} Z_{2к} = 2I_{2a}$$

Проверка поведения выходного реле органа сравнения фаз при КЗ вне защищаемой зоны производится при отключенном от приемопередатчика органе сравнения фаз (снимается крышка соответствующего испытательного блока). У защиты типа ДФЗ-503 дополнительно выводится из работы блокировка при неисправностях цепей напряжения (снимается перемычка SX5 в цепи обмотки реле 2-КР5, см. рис. 9.2).

При пусковых органах, реагирующих на ток обратной последовательности, имитируется однофазное КЗ на фазе В в диапазоне токов от 1,05 тока срабатывания реле 1-2КР (или реле 1-2КР защиты ДФЗ-503 при использовании токового пуска) до тока, равного 7 $I_{ном}$. При подаче на защиту любого значения тока в указанном диапазоне якорь выходного реле органа сравнения фаз не должен вздрагивать, чем проверяется надежность блокировки защиты при КЗ вне защищаемой зоны. При использовании в защите ДФЗ-503 пускового органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности, имитируется двухфазное КЗ на фазах АВ. Напряжение на защиту по подается от 1,05 напряжения срабатывания реле 1-КР2 до 120 В; при любом значение напряжения в указанном диапазоне якорь реле 2-КР4 органа сравнения фаз не должен вздрагивать.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Проверка времени срабатывания защиты при КЗ в защищаемой зоне производится дважды: при несимметричном КЗ и при симметричном КЗ. В первом случае имитируется однофазное КЗ на фазе В при использовании в защите пускового органа, реагирующего на ток обратной последовательности, или двухфазное КЗ на фазах ВС при использовании в защите пускового органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности. При обоих видах имитации подводимый ток (напряжение) устанавливается таким, чтобы ток в обмотке реле 1-2КР (1-КР2 для защиты ДФЗ-503) в 2 раза превышал ток его срабатывания (ток измеряется миллиамперметром магнитоэлектрической системы с малым потреблением). Остановка миллисекундомера осуществляется контактами выходного реле. Время срабатывания определяется как среднее из трех измерений и должно соответствовать заводским данным.

При симметричном КЗ проверяется время работы при срабатывании только токовых реле 1-1КА и 1-2КА и реле 1-KZ для защит ДФЗ-201 и ДФЗ-504, для защиты ДФЗ-503 - только реле 1-KZ.

9.7. Проверка защиты током нагрузки линии

Проверка защиты током нагрузки производится одновременно с обеих сторон линии при полностью собранных цепях (сняты только контактные мостики в цепях отключения выключателей и в цепях сигнализации), переключающее устройство находится в положении “сигнал”.

Проверка производится в следующем объеме:

проверка правильности подведения к защите цепей тока и напряжения;

проверка правильности включения реле сопротивления;

проверка правильности настройки фильтра тока (напряжения) обратной последовательности пускового органа и включения его компенсирующего устройства (последнее - только для защиты типа ДФЗ-503);

проверка правильности включения комбинированного фильтра органа манипуляции ВЧ приемопередатчиком;

проверка правильности включения, настройки и уставки устройства компенсации емкостных токов в органе манипуляции;

проверка действия блокировки защиты при неисправностях цепей напряжения;

снятие фазной характеристики и определение углов блокировки защиты;

проверка правильности фазировки цепей тока и напряжения по обеим сторонам линии;

проверка исправности цепей отключения выключателей линии;

проверка обмена ВЧ импульсами на нормально работающей линии.

Проверка правильности подведения к защите цепей тока и напряжения. При проверке измеряются вторичные напряжения на панели защиты стороны звезды и разомкнутого треугольника и производится их фазировка с действующими зажимами цепей напряжения. Затем измеряются вторичные токи в фазах защиты, снимается их векторная диаграмма и измеряется ток небаланса в нулевом проводе.

Анализом снятой векторной диаграммы на основании показаний щитовых ваттметров защищаемой линии и сведений от диспетчера о распределении активной и реактивной

Файл скачан с www.turbinist.ru

мощности определяется направление вектора первичных токов и правильность подведения цепей тока к защите.

Проверка правильности включения реле сопротивления производится путем перевода реле сопротивления в режим работы органом направления (см. § 9.2). Поведение контактов реле должно соответствовать данным векторной диаграммы (подробнее см. разд. 1).

Проверка правильности настройки фильтра тока (напряжения) обратной последовательности. При проверке настройки фильтра тока обратной последовательности измеряется ток в обмотках исполнительных реле миллиамперметром магнитоэлектрической системы при прямом и обратном чередованиях фаз токов, подаваемых на защиту. Ток небаланса при прямом чередовании не должен превышать (при максимальной нагрузке; при других нагрузках производится пропорционально пересчет) тока возврата более грубого исполнительного реле; ток в обмотках исполнительных реле при обратном чередовании бывает, как правило, достаточным для срабатывания этих реле.

При проверке настройки фильтра напряжения обратной последовательности (в защите типа ДФЗ-503) измеряется ток в обмотках реле 1-КР1 и 1-КР2 (см. рис. 9.2) при прямом и обратном чередовании фаз напряжения, подаваемого на защиту. При прямом чередовании ток небаланса не должен превышать 0,3 мА, при обратном чередовании ток в реле должен быть примерно 25-30 мА.

При повышенных значениях тока небаланса выясняются причины повышенного небаланса (подробнее см. § 6.8).

Для проверки правильности включения компенсирующего устройства пускового органа защиты ДФЗ-503 на защиту подается обратное чередование фаз токов и напряжений (перекрещиваются фазы В и С) и при поочередном отсоединении фаз А, В и С от защиты с заменой отсоединенной фазы нулевым проводом измеряются токи в обмотках реле 1-КР1 и 1-КР2 при подключении только цепей тока, только цепей напряжения и при одновременном подключении цепей тока и напряжения. Измеренные токи в реле при одновременном подключении тока и напряжения сопоставляются с построенными на векторной диаграмме величинами $U_{2р}$ (где $U_{2р}=U_{2а} - i I_{2а} Z_{2к}$) для данной нагрузки и заданной уставки $Z_{2к}$ (рис. 9.7) и должны быть соответственно пропорциональны. Векторные диаграммы построены с учетом соотношений и углов между составляющими обратной последовательности токов и напряжений (подробнее см. § 6.2). Четкие результаты обеспечиваются при соблюдении условий $I_{ф} Z_{2к} \geq 0{,}05 U_{ф}$, где $I_{ф}$ и $U_{ф}$ - фазные значения тока и напряжения при проверке. Для получения более четких результатов при небольших токах нагрузки иногда устанавливают максимальную уставку по $Z_{2к}$ (расчет в этом случае ведется на это значение $Z_{2к}$).

Файл скачан с www.turbinist.ru

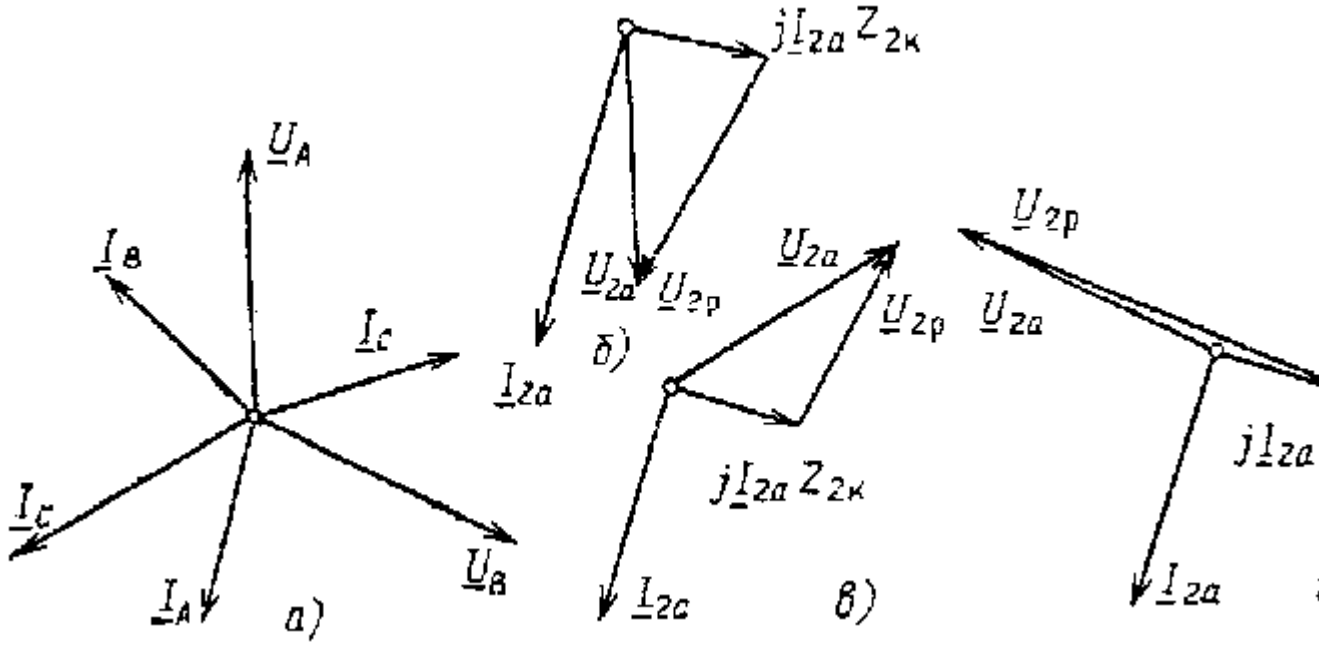


Рис. 9.7. Векторные диаграммы, поясняющие проверку правильности включения компенсирующего устройства пускового органа защиты ДФЗ-503 током нагрузки линии:

а - векторная диаграмма первичных токов и напряжения линии; б - отключено напряжение фазы А; в - отключено напряжение фазы В; г - отключено напряжение фазы С

Проверка правильности включения комбинированного фильтра $I_1 + kI_2$ органа манипуляции. При проверке измеряется ток во вторичной обмотке трансформатора 2-$TL_м$ (см. рис. 9.1) органа манипуляции чувствительным миллиамперметром переменного тока или напряжение на выходе органа манипуляции вольтметром с малым потреблением (можно использовать вольтметр прибора ВАФ-85) при подаче на панель защиты обратного и прямого чередований фаз токов. Отношение напряжения (тока), измеренного при обратном чередовании, к напряжению (току), измеренного при прямом чередовании, должно быть примерно равно коэффициенту k комбинированного фильтра. При больших нагрузках, когда загораются стабилитроны, и при очень малых нагрузках, когда сильно проявляется нелинейность цепей со сталью, полученные при проверке значения коэффициента k различаются значительно. При проверке защиты ДФЗ-503 цепи напряжения отсоединяются от трансформаторов напряжения и закорачиваются на входе панели.

Проверка правильности включения, настройки и уставки устройства компенсации емкостных токов в органе манипуляции. При первом включении защиты необходима проверка соответствия заданных уставок устройства компенсации фактическим емкостным токам линии при отключении ее с противоположного конца.

.

При таком режиме в линии со стороны, где она включена, проходит чисто емкостный ток, равный полному емкостному току линии (при наличии на линии реакторов они должны быть отключены только на противоположной стороне).

Для проверки компенсации емкостных токов обратной последовательности на входе панели перекрещиваются фазы тока В и С и фазы напряжения В и С. На выходе органа манипуляции подключается электронный вольтметр. При поочередной подаче на панель только тока обратной последовательности, только напряжения обратной последовательности и совместной подаче тока и напряжения измеряются напряжения на выходе органа манипуляции. При подаче только

Файл скачан с www.turbinist.ru

тока обратной последовательности вольтметр измеряет напряжение $U_м$, соответствующее полному емкостному току линии, при подаче только напряжения обратной последовательности - напряжение компенсации, при совместной подаче - напряжение $U_м$ с учетом компенсации. Если уставками задана компенсация половины емкостных токов, то два последних измерения должны быть примерно равны между собой, а сумма их должна быть равна первому измерению.

Для проверки компенсации емкостных токов прямой последовательности на вход панели поочередно подаются только ток прямой последовательности, только напряжение прямой последовательности и ток и напряжение вместе. Особенностью проверки являются значительно меньшие значения $U_м$ и искажение результатов при имеющейся несимметрии первичных токов или напряжений.

Дополнительно проверяется правильность включения устройства компенсации емкостных токов обратной последовательности под рабочим током. Электронным вольтметром измеряется напряжение на выходе органа манипуляции также при подведении к панели только напряжения обратной последовательности (перекрещены фазы В и С), при поочередном подведении только тока одной из фаз тока в фазу А панели и при их совместном подведении к панели.

При одновременной подаче на панель напряжения обратной последовательности и тока одной из фаз напряжения $U_м$ во всех трех сочетаниях будут значительно отличаться друг от друга и будут зависеть от значения тока и угла сдвига фаз нагрузки:

$$U_{2м} = I_{2a} Z_ф - j U_{2a} y_{2к} Z_ф,$$

где I_{2a} - составляющая тока обратной последовательности фазы А от соответствующего тока, подводимого к панели защиты; $j U_{2a} y_{2к} Z_ф$ - напряжение компенсации обратной последовательности (при перекрещенных фазах напряжения В и С); $U_{2м}$ - результирующее напряжение обратной последовательности на выходе органа манипуляции.

Если данные построения векторной диаграммы (рис. 9.8) и результаты измерений совпадают, значит, устройство компенсации емкостных токов включено правильно.

Файл скачан с www.turbinist.ru

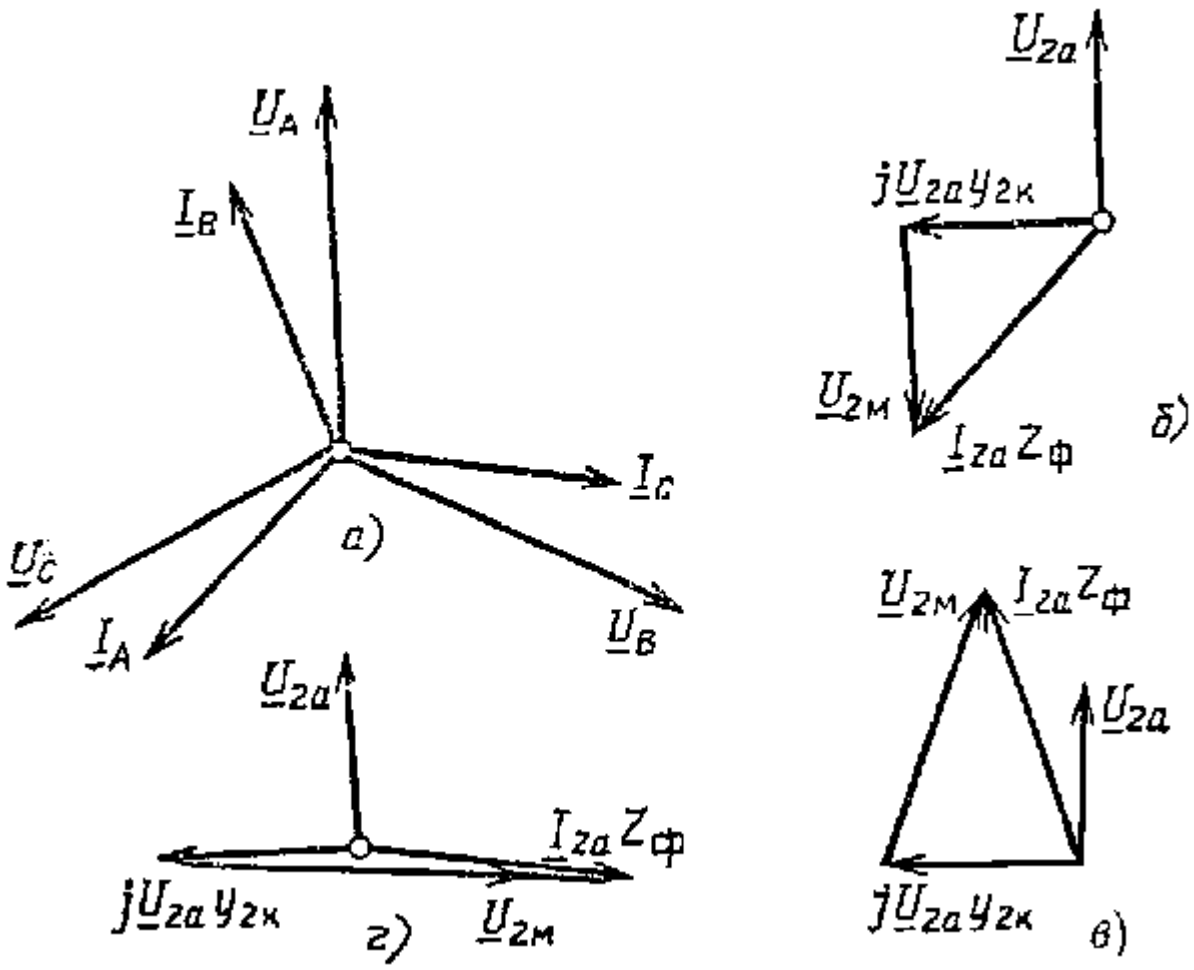


Рис. 9.8. Векторные диаграммы, поясняющие проверку правильности включения компенсирующего устройства емкостных токов обратной последовательности органа манипуляции защиты ДФЗ-503 током нагрузки линии:

а - векторная диаграмма первичных токов и напряжений линии; б - к защите подведен ток фазы А; в - к защите подведен ток фазы В; г - к защите подведен ток фазы С

Проверка действия блокировки защиты при неисправностях в цепях напряжения (только в ДФЗ-503). При проверке измеряется ток небаланса в обмотке исполнительного реле блокировки 2-КР5 (см. рис. 9.2) миллиамперметром магнитоэлектрической системы с малым потреблением при нормальной схеме. Ток небаланса обычно бывает менее 0,1 мА. Затем при поочередном снятии всех фаз комплекта звезды трансформаторов напряжения (А, В, С, 0 и АВС) и всех фаз комплекта разомкнутого треугольника трансформаторов напряжения ($a_н$, $b_н$, $c_н$ и с $a_н b_н c_н$) измеряют также ток в обмотке исполнительного реле (миллиамперметр на пределах до 40 мА) и наблюдают за поведением контактов исполнительного реле. Реле при всех комбинациях снятия фаз должно четко срабатывать (кратность тока к току срабатывания при самых неблагоприятных случаях - не менее четырех).

Снятие фазной характеристики и определение углов блокировки защиты. При снятии фазной характеристики определяется зависимость тока в обмотке отключающего выходного реле органа сравнения фаз от угла сдвига между ВЧ импульсами приемопередатчиков. Фазная характеристика снимается при номинальных напряжениях постоянного тока. Защищаемая линия при этом может быть отключена. Приемопередатчики с обеих сторон запускаются кнопками. На выходе приемопередатчиков (параллельно ВЧ кабелям) подключаются

Файл скачан с www.turbinist.ru

электронные осциллографы. К манипуляторным лампам приемопередатчиков через изолирующие трансформаторы подводится напряжение $U_м$ = 100 В (рис. 9.9). Последовательно с обмоткой отключающего реле органа сравнения фаз включается миллиамперметр магнитоэлектрической системы. Угол напряжения манипуляции регулируется с одной стороны линии фазорегулятором и контролируется фазометром (фазоиндикатором). С помощью фазорегулятора устанавливается нуль отсчета - такое положение ВЧ импульсов, когда середины их совпадают. Изменяя угол между ВЧ импульсами от 0 до 360° через каждые 15-30°, по миллиамперметрам, измеряющим ток в обмотках отключающих реле, определяют токи для различных значений углов. По полученным данным строится фазная характеристика защиты. При снятии обеих ветвей фазной характеристики измеряют токи срабатывания и возврата отключающих реле и соответствующие им углы блокировки. При отклонении измеренных углов блокировки от заданных производится подстройка переключением дополнительных секций обмоток или непосредственно механической регулировкой самих реле. При несимметричной фазной характеристике за угол блокировки принимается меньший из углов. Несимметрия вызывается различием ВЧ сигналов своего и удаленного приемопередатчиков, искажением формы импульсов и отраженными импульсами (при одночастотной настройке). При несимметрии 5-8° защиту можно включать в работу, при больших отклонениях необходимо найти и устранить причину.

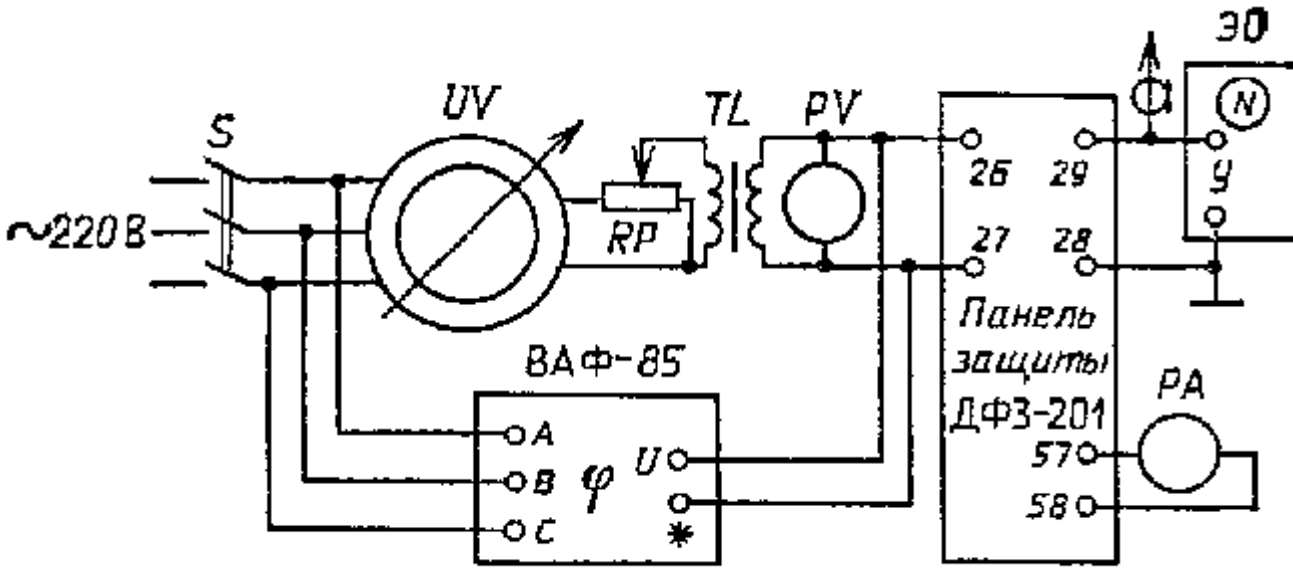


Рис. 9.9. Схема снятия фазной характеристики дифференциально-фазной ВЧ защиты типа ДФЗ-201 при помощи фазорегулятора:

UV - фазорегулятор; ВАФ-85 - вольтамперфазоиндикатор; TL - изолирующий трансформатор; ЭО - электронный осциллограф; 1 - ВЧ кабель

Снятие фазной характеристики производится только при первом включении защиты (или при каких-либо изменениях, касающихся блока сравнения фаз к приемопередатчика). При нормальных эксплуатационных проверках ее не снимают. Для контроля за состоянием органа сравнения фаз измеряют только токи срабатывания и возврата обоих поляризованных реле при питании органа сравнения фаз переменным напряжением от постоянного источника (см. § 9.4). В связи с тем что форма кривой тока органа сравнения фаз при снятии фазной характеристики значительно отличается от синусоидальной, токи срабатывания и возврата поляризованных реле, определенные по фазной характеристике, будут отличаться от измеренных при питании органа фаз переменным напряжением от постороннего источника.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Проверка правильности фазировки тока и напряжения по обеим сторонам линии. При проверке приемопередатчики пускаются кнопками. Проверка соответствия фазировки цепей тока каждой стороны производится по току в обмотках отключающих поляризованных реле органов сравнения фаз. Дополнительно контролируются токи приема по миллиамперметрам приемопередатчиков. На выходе приемопередатчиков включают электронные осциллографы. При подаче на одной из подстанций в защиту тока только одной фазы на другой подстанции в защиту подаются поочередно токи всех трех фаз в одну и ту же фазу. При подаче в защиты одноименных фаз токи в обмотках отключающих поляризованных реле и токи приема должны быть равны нулю на обоих комплектах защиты. На экранах осциллографов середины импульсов обоих передатчиков будут сдвинуты примерно на 180°, т. е. будут отсутствовать перерывы между импульсами токов ВЧ.

Такая же проверка производится при поочередном подключении к защите на первой подстанции токов двух других фаз. На питающем конце линии могут иметь место небольшие токи в отключающих поляризованных реле и на выходе приемника, обусловленные конечной скоростью распространения ВЧ сигналов (6° на каждые 100 км линии) и сдвигом фаз между токами на концах линии, который вызывается ее емкостной проводимостью (особенно при малых нагрузках). На экране осциллографа можно измерить и оценить эти сдвиги (подробнее см. § 9.8). Для защиты ДФЗ-503 дополнительно проводится фазировка при включенной компенсации емкостных токов.

После проверки соответствия фазировки цепей тока на обоих полукомплектах к защитам подводятся все три фазы тока по нормальной схеме. Измеряются токи в обмотках отключающих поляризованных реле органа сравнения фаз и токи приема при нормальном подведении манипуляции (от органа манипуляции к приемопередатчику) и при перекрещенных проводах цепей манипуляции на одной из подстанций. В первом случае токи должны быть равны нулю (за исключением случаев, описанных выше), во втором случае при достаточной нагрузке линии могут срабатывать реле. Фазировка проверяется только при новом включении или при изменениях в токовых цепях защиты. При плановых проверках защиты измеряются токи в реле и в приемнике при всех фазах тока.

Для защиты типа ДФЗ-503 (при использовании емкостной компенсации) дополнительно производится фазировка цепей напряжения на обеих подстанциях. Цепи тока от защит отключаются, на обоих полукомплектах защиты перекрещиваются фазы В и С напряжения, таким образом, на защиту подается напряжение обратной последовательности, измеряется ток на выходе приемников и в обмотках реле 2-КР4 (см. рис. 9.2). При правильной фазировке цепей напряжения ток в обмотках реле 2-КР4 должен быть не менее 2 мА при длине линий 100 км и больше.

Проверка исправности цепей отключения выключателей линии производится опробованием действия защиты на отключение выключателей. Действие защиты имитируется нажатием вручную на якорь выходного реле защит или подачей плюса оперативного тока на переключающее устройство защиты.

Проверка обмена ВЧ импульсами на нормально работающей линии. При проверке измеряется ток приема и ток выхода приемопередатчика по его приборам. При запуске передатчика только с одной стороны (при достаточном токе нагрузки линии) ток приема и ток выхода имеют определенные значения (указываются на табличке), срабатывает сигнальное реле органа сравнения фаз и выпадает сигнальное реле “вызов”. При одновременном запуске обоих передатчиков ток приема падает до нуля, ток выхода имеет максимальное значение.

9.8. Особенности проверки защит на линиях с ответвлениями и на протяженных линиях 220-500 кВ

Панели дифференциально-фазных ВЧ защит в заводском исполнении не приспособлены для использования на линиях с ответвлениями. Для использования защит на таких линиях в них вносятся изменения. Изменения зависят от количества ответвлений, наличия или отсутствия

Файл скачан с www.turbinist.ru

питания со стороны ответвления и других факторов и вносятся по указанию служб релейных защит. Основные изменения следующие:

загрубление отключающего реле, включенного на выходе фильтра токов обратной последовательности в пусковых органах защит;

установка дополнительных пусковых органов (дополнительные реле тока, реле сопротивления, реле мощности обратной последовательности и т. д.).

Загрубление реле 1-2КР (защит ДФЗ-201 и ДФЗ-504) производится одним из двух способов при сохранении прежней чувствительности реле 1-1КР:

1) изменением рабочего и тормозного моментов реле. Для этого рабочая обмотка, имеющая большее число витков, используется как тормозная, а тормозная - как рабочая. Величина загрубления определяется тормозным током, который регулируется подбором нужного сопротивления добавочного резистора;

2) шунтированием рабочей обмотки реле 1-2КР резистором. Оба способа позволяют загрубить реле в 2,25 раза по сравнению с заводской регулировкой.

При необходимости общего загрубления реле 1-1КР и 1-2КР на выходе выпрямительного моста устанавливается дополнительный конденсатор, при этом можно получить загрубление в 1,5 раза.

Возможно применение общего загрубления обоих реле и дополнительного загрубления реле 1-2КР.

При фазировке цепей тока на линиях с ответвлениями проверяется фазировка попарно между отдельными полукомплектами при отключенных других концах. При невозможности отключения линии с других концов фазировка производится с предварительным определением угла между токами, подаваемыми на полукомплекты защит на разных подстанциях.

При фазировке цепей тока протяженных линий 220-500 кВ емкостные токи их значительно влияют на фазовый сдвиг между токами по концам линии, причем чем меньше нагрузка линии, тем сильнее влияние. В предельном случае при активной мощности, равной или близкой к нулю, и большей разнице по уровню напряжений на концах линии направление токов по концам линии будет одинаковым, угол θ будет примерно равен нулю, защита может ложно сработать (если нет устройства емкостной компенсации в органе манипуляции).

Для исключения ошибок при фазировке необходимо предварительно оценить угол сдвига между ВЧ импульсами ψ. При значительных углах сдвига (20° и более) угол ψ подсчитывается по формуле $\psi = 0 \pm \alpha$, где θ - угол между токами по концам линии, вызванный емкостными токами; α - угол, вызванный запаздыванием ВЧ сигналов (6° на 100 км длины линии); знак плюс принимается на питающем конце, минус - на приемном.

Угол θ подсчитывается по приближенной формуле

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{P}{3I^2\left[X_C - (X_L/2)\right] + Q},$$

где P и Q - активная и реактивная мощность в линии на данном ее конце, МВт и Мвар; I - ток на данном конце линии, кА; X_C и X_L - емкостное и индуктивное сопротивление линии, Ом.

Методика определения направления мощности приведена в разд. 1. При фазировке тока защит ДФЗ-503 дополнительно к проверкам, изложенным в § 9.7, целесообразно провести

Файл скачан с www.turbinist.ru

фазировку при включенных устройствах компенсации емкостных токов в органе манипуляций. При включенных устройствах угол ψ будет компенсироваться полностью.

Раздел десятый

НАЛАДКА ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ И ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

10.1. Схемы включения реле направления мощности поперечных дифференциальных защит

Выполнение токовых цепей защиты. Поперечные дифференциальные направленные защиты применяются в качестве основных защит двух параллельных линий 35-220 кВ с односторонним питанием, а также линий 35-110 кВ с двусторонним питанием. Защиты осуществляют выбор и отключение поврежденной линии, оставляя в работе параллельную, не поврежденную. Выбор поврежденной линии осуществляется избирателями - реле направления мощности двустороннего действия типа РБМ-270. Пусковые реле максимального тока типа РТ-40, включенные на фазные токи и ток нулевой последовательности, фиксируют возникновение аварийного режима в зоне работы по значению тока. Для выполнения защиты на линиях W1 и W2 устанавливают однотипные трансформаторы тока ТА с одинаковыми коэффициентами трансформации и соединяют их по схеме на разность токов, как показано на рис. 10.1. На линии W1 в нуль звезды объединяют выводы $И_2$ ТА1, фазные провода выводят с $И_1$; на W2 в нуль звезды объединяют выводы $И_1$ ТА2, фазные провода выводят с $И_2$. Соединения производятся перемычками, устанавливаемыми на внутренней стороне рядов зажимов.

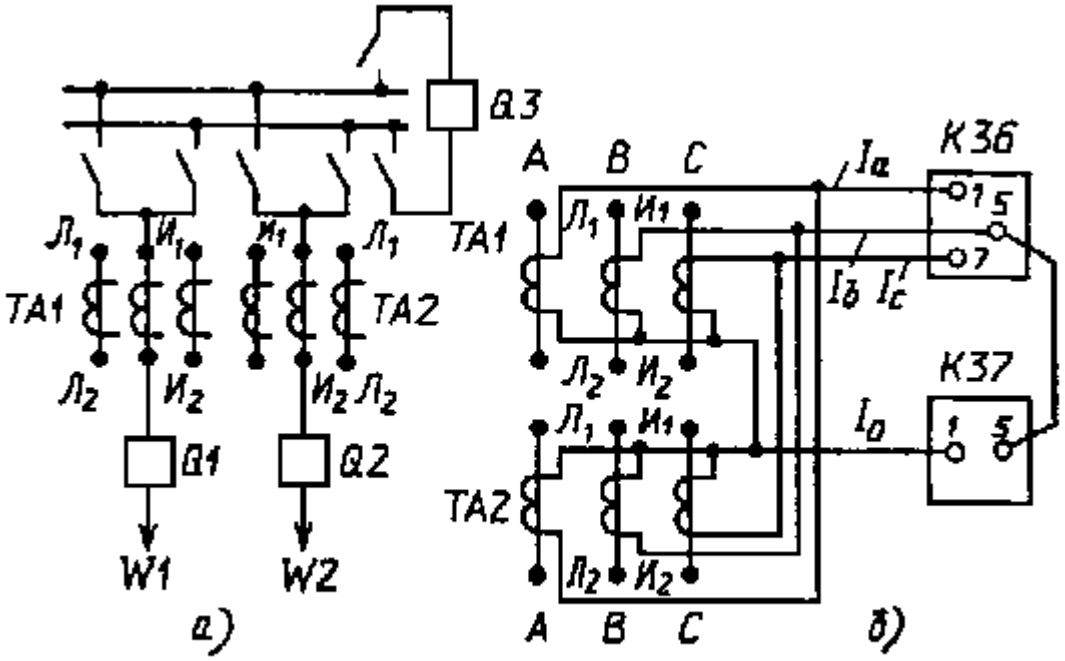


Рис. 10.1. Схема токовых цепей поперечной дифференциальной направленной защиты:

Файл скачан с www.turbinist.ru

а - схема первичных соединений; б - схема подключения токовых цепей комплектов КЗ 6 и КЗ 7

Для обеспечения возможности переключений при проверке защиты под нагрузкой в токовых цепях поперечных защит должны использоваться только испытательные зажимы.

Последовательно соединенные обмотки реле направления мощности (избиратели) и токового реле (пусковые органы) включаются параллельно обмоткам ТА1, ТА2, соединенным на разность токов, чем обеспечивается циркуляция по токовым цепям защиты вторичных токов ТА обеих линий. Такое соединение ТА, когда ток в реле равен разности вторичных токов линий $I_p = I_1 - I_2$, характерен для поперечной дифференциальной защиты с циркулирующими токами. В нормальных режимах, когда по линиям протекают равные по значению и совпадающие по фазе токи нагрузки, ток в реле равен нулю, т.е.

$$I_p = I_1 - I_2 = 0.$$

Практически из-за некоторой разницы первичных токов, различия характеристик ТА1 и ТА2 в дифференциальной цепи всегда проходит небольшой ток небаланса, значительно возрастающий при внешних КЗ. От максимального тока небаланса при внешних КЗ отстраиваются соответствующей уставкой срабатывания пускового органа.

При КЗ в зоне действия защиты на одной из линий токи, проходящие по линиям, не равны и в дифференциальной цепи протекает ток, совпадающий с направлением тока линии, на которой произошло КЗ (рис. 10.2). В случае КЗ на линии W1 токи замыкания по линиям будут различны, при этом $I_1 > I_2$ и ток в реле $I_p = I_1 - I_2$ совпадает по фазе с током поврежденной линии. Реле направления мощности включают так, чтобы оно в этом режиме произвело выбор отключения именно поврежденной линии, т. е. W1. Аналогично защита должна работать при КЗ на линии W2. При возникновениях КЗ в зоне действия защиты, на одной из ЛЭП вблизи шин противоположной подстанции, когда разница токов I_1 и I_2 незначительна и поэтому реле-избиратели могут не работать, защита действует каскадно, т. е. сначала отключается от своих защит выключатель поврежденной линии на противоположном конце, а затем уже работает защита на данном конце.

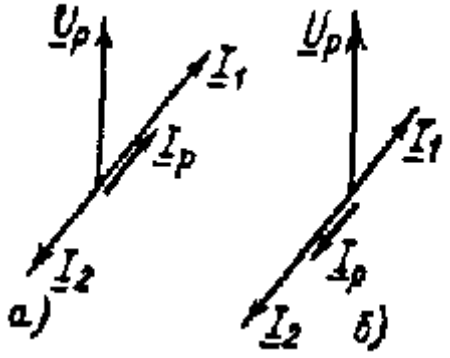


Рис. 10.2. Векторная диаграмма токов в цепях поперечной дифференциальной защиты:

а - при КЗ на W1; б - при КЗ на W2

Файл скачан с www.turbinist.ru

Схемы включения реле направления мощности аналогичны рассмотренным в разд. 3, в защитах от междуфазных КЗ реле включаются обычно по 90-градусной схеме, в защите от замыканий на землю - на фильтр токов и напряжений нулевой последовательности.

Комплектные устройства защиты типов КЗ 6 и КЗ 7. Как правило, поперечные дифференциально-направленные защиты линий выполняются с использованием комплектных устройств: комплекта защиты типа КЗ 6 - для выполнения поперечной дифференциальной токовой направленной защиты при междуфазных КЗ (рис. 10.3), комплекта защиты типа КЗ 7 - для выполнения поперечной дифференциальной токовой направленной защиты при замыканиях на землю (рис. 10.4). Комплект КЗ 6 может использоваться отдельно, как самостоятельная автономная защита, комплект КЗ 7 обычно используется только для выполнения защит при одновременном использовании обоих комплектов, когда избиратель и пусковые органы комплекта КЗ 7, действуют на выходные органы KL1 и KL2 комплекта КЗ 6, для совместной работы комплекты включаются по схеме, приведенной на рис. 10.5. При совместном использовании комплектов оперативный ток на защиту может подаваться через последовательно соединенные замыкающие контакты реле KQC1 и KQC2 (KQC1 - реле положения “включено” выключателя Q1 линии W1, KQC2 - реле положения “включено” выключателя Q2 линии W2); или контакты KQC1, KQC2 могут выполнять также блокирующие функции при включении их непосредственно в цепи выходных реле KL1 и KL2. Контакт KQC2 включают последовательно с KL1 (в рассечку между выводами 8-10), контакт KQC1 - последовательно с KL2 (между выводами 14-16). Этим достигается автоматический вывод защиты из работы при отключении выключателя одной из линий, для исключения возможного отключения оставшейся в работе линии при сквозном КЗ вне зоны защиты.

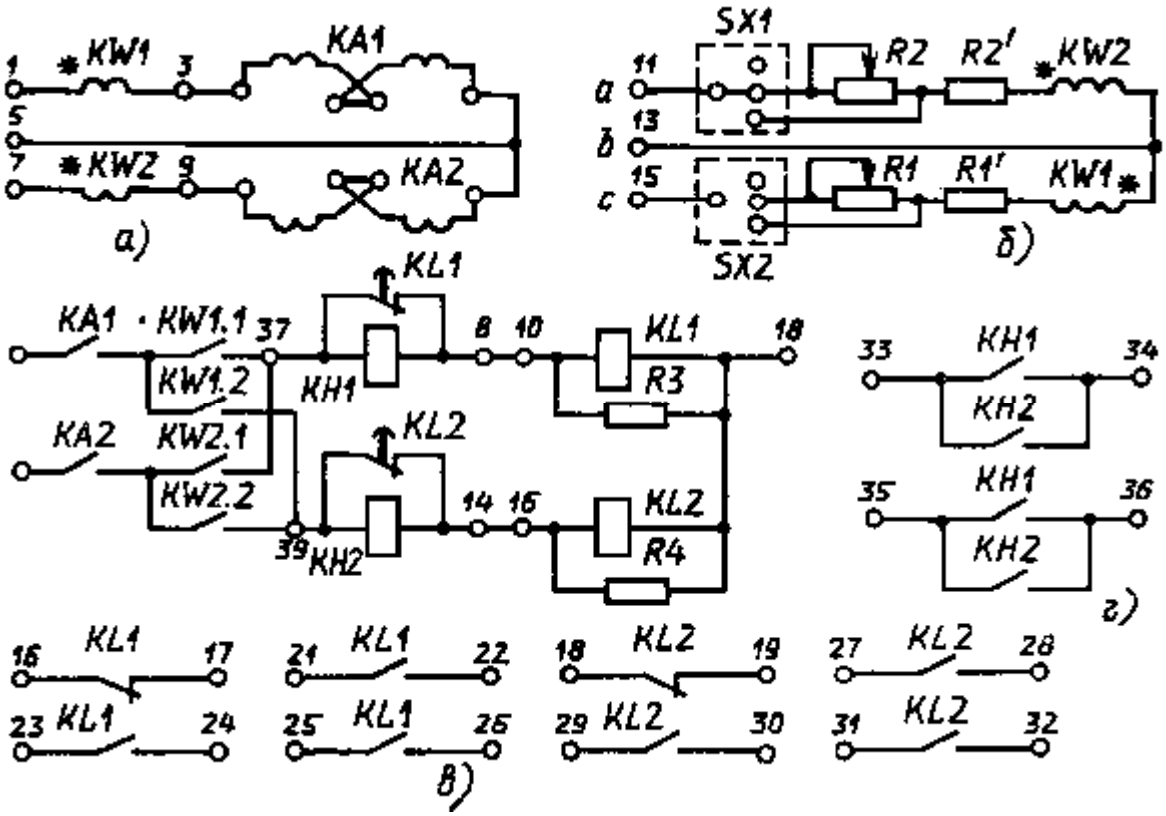


Рис. 10.3. Принципиальная схема комплекта защиты типа КЗ 6:

а - цепи переменного тока; б - цепи переменного напряжения; в - цепи оперативного постоянного тока; г - цепи сигнализации

Файл скачан с www.turbinist.ru

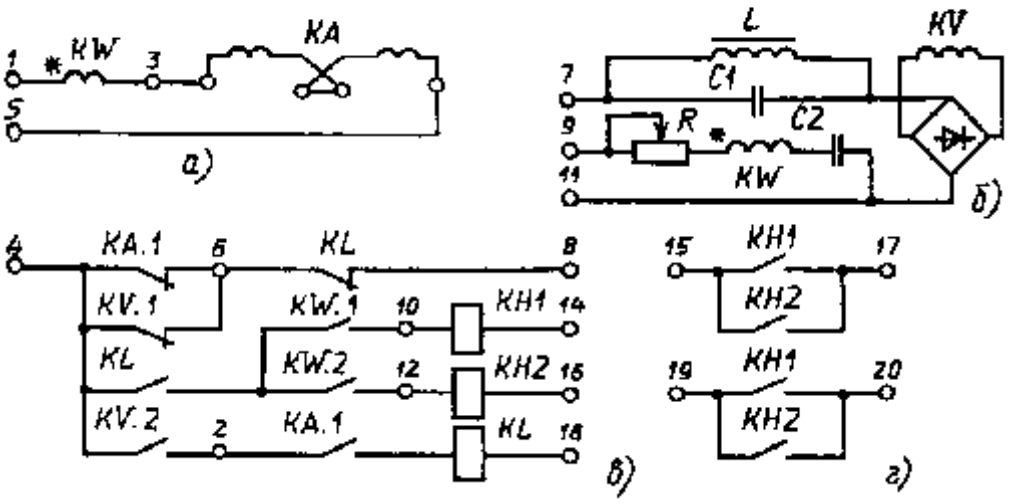


Рис. 10.4. Принципиальная схема комплекта КЗ 7:

а - цепи переменного тока; б - цепи переменного напряжения; в - цепи оперативного постоянного тока; г - цепи сигнализации

При наличии шиносоединительного выключателя Q3 контакты KQC1 и KQC2 включаются между выводами 14-16, 8-10, а оперативный ток подается на защиту через переключающее устройство X, имеющее три фиксированных положения I, II, III (рис. 10.5, в):

Файл скачан с www.turbinist.ru

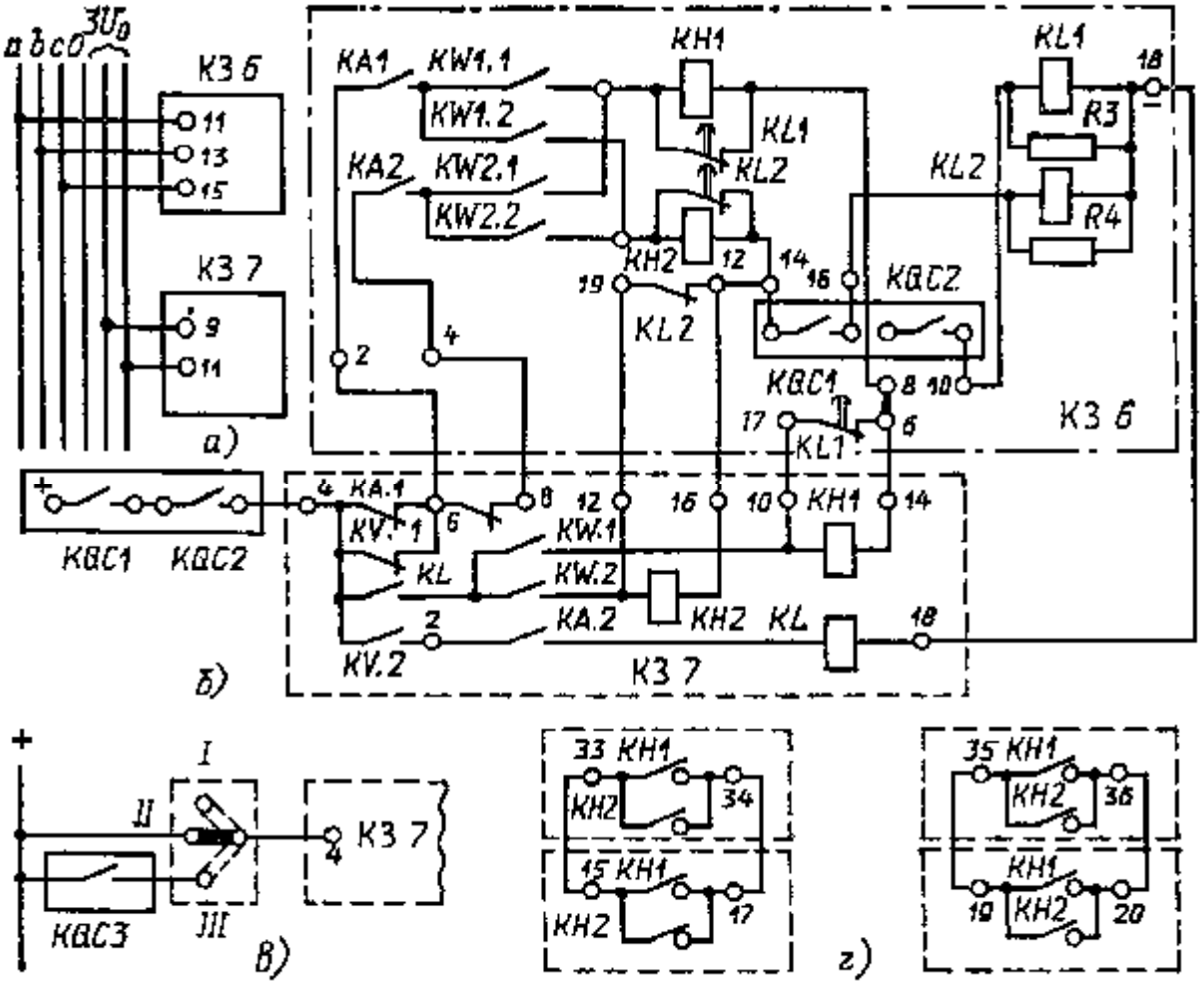


Рис. 10 5. Принципиальная схема соединения комплектов защиты типов КЗ 6 и КЗ 7:

а - цепи переменного напряжения; б -цепи оперативного постоянного тока; в - подача оперативного тока на защиту при наличии шиносоединительного включателя Q3; г - цепи сигнализации. Части схемы, обведенные пунктирной линией, относятся к комплекту типа КЗ 6, прерывистой линией - к комплекту КЗ 7, тонкой сплошной линией - контакты реле автоматики схемы управления Q1, Q2 и Q3

I - оперативный ток с защиты снят, защита выведена из работы;

II - выключатель Q3 не используется (например, выведен в ремонт), оперативный ток подан на защиту, защита введена в работу;

III - выключатель Q3 находится в работе, оперативный ток подан на защиту через контакты KQC3 реле положения “включено” выключателя Q3. При отключении Q3 защита автоматически выводится из работы.

В комплекте защиты КЗ 6 установлены два реле максимального тока КА1 и КА2 (пусковые органы), два реле направления мощности KW1 и KW2 (избиратели), два промежуточных реле KL1 и KL2 (выходные реле защиты), два указательных реле КН1 и КН2. При междуфазных КЗ в зоне действия защиты работают пусковые реле поврежденных фаз и в зависимости от того, на какой линии повреждение, избиратели KW1, KW2 производят выбор - замыкают правые или левые контакты. При замыкании правых контактов KW1.1, KW2.1 напряжение подается на выходное реле KL1, действующее на отключение W1. При замыкании левых контактов KW1.2, KW2.2 напряжение подается на входное реле KL2, действующее на отключение W2. Выходные

Файл скачан с www.turbinist.ru

реле KL1 и KL2 имеют замедление на срабатывание, которое необходимо для исключения ложного отключения выключателей при работе разрядников, когда пусковые реле и избиратели могут кратковременно замыкать контакты и подавать оперативный ток на обмотку выходного реле. Для исключения при этом ложного выпадения указательных реле КН1 и КН2 их обмотки шунтируются размыкающими контактами реле KL1 и KL2. Время срабатывания защиты может регулироваться изменением числа демпфирующих шайб на сердечнике реле KL1 и KL2 в пределах 0,12-0,2 с.

В комплекте защиты КЗ 7 установлены реле максимального тока КА, реле максимального напряжения нулевой последовательности KV (пусковые органы), реле направления мощности KW (избиратель), промежуточное быстродействующее реле KL, фиксирующее срабатывание пусковых органов, и указательные реле КН1 и КН2. При однофазных КЗ в зоне действия защиты максимальные реле пусковых органов своими размыкающими контактами КА1 и KV.1 снимают оперативный ток с защиты от междуфазных КЗ для исключения возможного ложного ее срабатывания (см. § 3.1). Реле-повторитель KL работает через последовательно соединенные замыкающие контакты KV.2 и КА.2. В зависимости от того, на какой линии произошло КЗ, реле направления мощности замыкает правые контакты KW.1 - работает выходное реле KL1 - или левые контакты KW.2 - работает выходное реле KL2 (KL1 и KL2 - реле комплекта КЗ 6). Указательные реле КН1 и КН2 комплекта КЗ 7 шунтируются размыкающими контактами KL1 и KL2 для исключения ложных сигналов. Комплекты КЗ 6 и КЗ 7 выполняются заводом на напряжение оперативного постоянного тока 110 или 220 В, пусковые органы - реле максимального тока КА, КА1 и КА2 - выполняются на токи до 200 А, реле максимального напряжения KV имеет уставки срабатывания 4-8 В. Последовательно с обмоткой KV включен фильтр L-C1 для уменьшения влияния составляющей третьей гармоники. Технические данные комплектных реле направления мощности приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Технические данные реле напряжения мощности, устанавливаемых в комплектах КЗ 6 и КЗ 7

Тип комплекта	Тип реле	Номинальный ток реле $I_{ном}$, А	Угол максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$, град.	Номинальная мощность срабатывания при $\varphi_{мч}$, $U_{ном}$ и токе $I_р = I_{ном}$, В·А
КЗ 6	РБМ-271/2	1	-30 ± 5	0,7
	РБМ-271/2	1	-45 ± 5	0,9
	РБМ-271/1	5	-30 ± 5	3,5
	РБМ-271/1	5	-45 ± 5	4,5
КЗ 7	РБМ-278/2	1	$+70 \pm 5$	0,24
	РБМ-278/1	5	$+70 \pm 5$	1,2

Мощность срабатывания реле направления мощности, устанавливаемых в комплектах, несколько увеличена по сравнению с реле этого же типа, но устанавливаемыми отдельно на панелях. Загрубление реле достигается дополнительной затяжкой противодействующих пружин - этим исключается возможность вибрации контактов встроенных реле мощности из-за близко расположенных других реле комплектов.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Реле мощности комплекта КЗ 7 не предназначено для длительного режима включения цепи напряжения и выдерживает напряжение 100 В на обмотке в течение 1 мин.

Изменение угла максимальной чувствительности реле KW1 и KW2 комплекта КЗ 6 осуществляется переключающими устройствами SX1 и SX2. При использовании последовательно включенных резисторов R1-R1' и R2-R2' реле KW1 и KW2 имеют $\varphi_{мч} = -45 \pm 5°$, при исключении резисторов R1 и R2 $\varphi_{мч} = -30 \pm 5°$ (см. рис. 10.3). Выполнение защиты при использовании отдельных реле, монтируемых на панели, в основном аналогично рассмотренной схеме с комплектами КЗ 6 и КЗ 7.

Для удобства работы с заводской документацией обозначения соответствующих элементов приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Обозначения элементов, входящих в комплекты КЗ 6 и КЗ 7

Цепи переменного тока, напряжения		Цепи оперативного постоянного тока		Цепи сигнализации	
в справочнике	в схемах завода-изготовителя	в справочнике	в схемах завода-изготовителя	в справочнике	в схемах завода-изготовителя
KA	PT	KL	РП	KH1	1РУ
KA1	1PT	KL1	1РП	KH2	2РУ
KA2	2PT	KL2	2РП		
KV	PH	SX1	ПУ1		
KW1	1PM	SX2	ПУ2		
KW2	2PM				

10.2. Особенности наладки и проверки поперечных дифференциальных направленных защит под нагрузкой

Контактная система реле типа РБМ-270 состоит из двух замыкающих контактов двустороннего действия (у реле, не встроенных в комплект - без общей точки). Противодействующий момент на подвижной контактной системе создается двумя возвратными спиральными пружинами с упорными поводками, которые воздействуют на вертикальный штифт, установленный на траверсе подвижных контактов. При отсутствии на реле электрического момента подвижные контакты под действием равных и противоположных моментов возвратных пружин устанавливаются в среднем нейтральном положении. Так как действие каждой пружины ограничено упором и поводки механически жестко не связаны со штифтом, то каждая пружина противодействует повороту подвижных контактов только в одну определенную сторону, поэтому реле имеет индивидуальную регулировку мощности срабатывания для каждой контактной пары. Натяжение каждой пружины устанавливается с помощью регулировочных колец, фиксирующихся двумя стопорными винтами.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Оперативный ток к подвижным контактам подводится через две горизонтально-параллельные мягкие спиральные пружины, которые укреплены на оси подвижного барабанчика и имеют встречную намотку, чем исключается дополнительный момент на подвижной контактной системе при отклонении ее от нейтрального положения на угол $\pm 15°$.

При ревизии механической части реле для оценки состояния подвижной системы необходимо регулировочными кольцами полностью ослабить возвратные (противодействующие) пружины и отвести поводки от штифта, предварительно отметив заводское положение регулировочных колец. При этом подвижные контакты должны оставаться в среднем нейтральном положении; если они отклоняются от среднего положения, то необходимо установить подвижную контактную систему в рабочее положение изменением натяжения токоподводящих пружин. У реле серии РБМ-270 с двусторонними контактами недопустимо отклонять подвижные контакты от среднего положения на угол более 15-20°, так как это может привести к повреждению токопроводящих пружин. Поэтому качания подвижной системы следует проверять без снятия пластины с неподвижными контактами, достаточно развернуть их в крайнее левое и правое положения. Подвижная система при отклонении ее на угол 15-20° должна совершать до остановки три-пять полных колебаний.

Проверку самоходов реле направления мощности производят при полностью ослабленных противодействующих пружинах в соответствии с указаниями § 2.6 с учетом следующих рекомендаций.

1. У реле направления мощности защиты от междуфазных КЗ необходимо устранить самоход от напряжения до 110 В при разомкнутой токовой обмотке.

Самоход от тока при закороченной обмотке напряжения проверяют до тока срабатывания пускового органа, так как при близких КЗ “за спиной”? когда напряжение на реле снижается до нуля (соответствует режиму закороченной обмотки напряжения), через реле протекает только ток небаланса. Если самоход от тока при ослабленных пружинах приводит к повороту подвижных контактов на некоторый угол, необходимо проверить поведение реле при заводской затяжке пружин. При заводской затяжке пружин реле от самохода по напряжению и по току не должно замыкать контакты.

Ограничиваться только проверкой поведения реле от напряжения и тока при заводской затяжке пружин без устранения самохода не следует, так как при последующей регулировке мощности срабатывания реле это может привести к значительным отличиям между углами затяжки каждой из пружин.

2. У реле направления мощности защиты от замыкания на землю необходимо устранить самоход по току до тока срабатывания пускового органа при закороченных цепях напряжения. Самоход от напряжения для реле защиты от замыкания на землю существенного значения не имеет, поэтому достаточно только проверить поведение реле от напряжения без устранения самохода.

Зоны работы и $\varphi_{мч}$ реле, как правило, определяются только для правой пары контактов - они соответствуют техническим данным, приведенным в табл. 10.1; для левой пары контактов зона работы и $\varphi_{мч}$ отличаются на 180°. Мощность срабатывания реле (чувствительность) проверяется обязательно для каждой пары контактов, при этом следует регулировкой затяжки пружин добиваться одинаковой чувствительности реле при замыкании контактов в обе стороны.

Проверку защиты на сброс обратной мощности не производят, так как значение этой мощности невелико и обусловлено только током небаланса? действие защиты блокируется пусковым органом даже при замыкании контактов реле мощности.

При комплексном опробовании защиты проверяют, чтобы оперативные цепи постоянного тока не имели объединения, выходные реле KL1 и KL2 отключали только выключатели своих линий и чтобы при отключении одного из выключателей защита выводилась из работы автоматически.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Некоторые особенности имеет и проверка защиты под нагрузкой, которую проводят, как правило, при поданном оперативном токе, но выведенных цепях отключения. Для проверки обе линии включают на параллельную работу, фазируют и проверяют цепи напряжения защиты. Для каждого комплекта ТА снимают векторные диаграммы токов нагрузки и строят их на одном бланке. По характеру первичной нагрузки линий определяют, на какой линии ТА собраны с прямой полярностью, на какой с обратной. Миллиамперметром измеряют ток небаланса в нулевых проводах каждой из групп трансформаторов тока и в дифференциальных цепях защиты. Только после этой проверки целости дифференциальных цепей можно приступить к проверке правильности включения реле направления мощности.

На векторной диаграмме наносят зоны работы реле направления мощности KW1, KW2 и KW (от междуфазных КЗ и замыканий на землю) и анализируют ожидаемое поведение каждого реле при имитации повреждения па обеих линиях.

При проверке реле типа РБМ-271 защиты от междуфазных КЗ закорачивают и отсоединяют от панели на испытательных зажимах токовые цепи одной из линий, как показано на рис. 10.6. Проверяют, какие контакты замкнулись, и вручную замыкают контакты обоих пусковых органов; еще раз убеждаются, что работает выходное реле данной линии. Правильность включения реле в защитах от междуфазных КЗ, как правило, проверяют при поочередном подведении к реле токов от каждой линии. Пропускают токи фазы, в которую включено данное реле; токи других фаз пропускаются в случае, если из-за характера нагрузки вектор тока лежит вблизи линии изменения моментов.

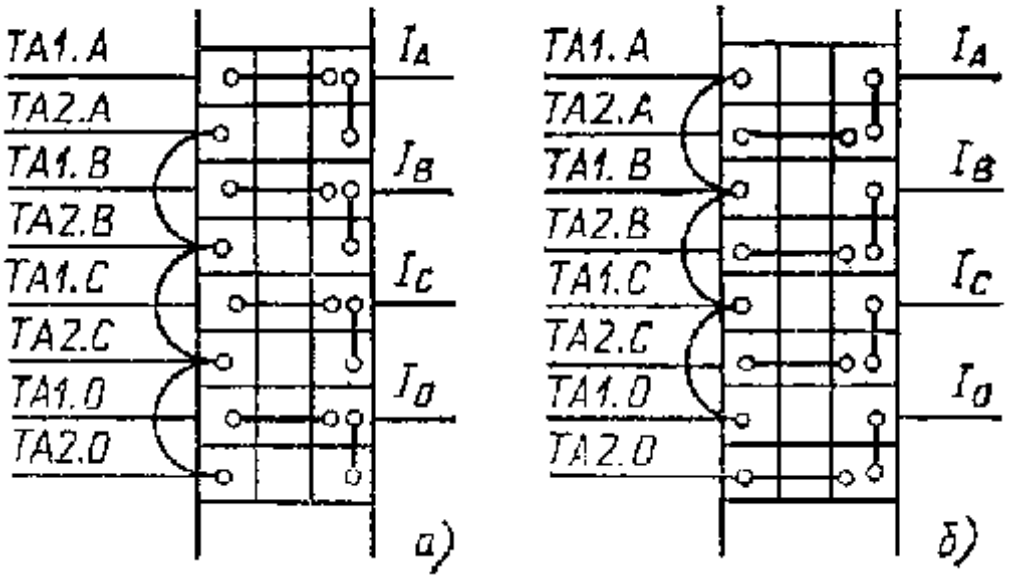


Рис. 10.6. Схема переключений на рядах зажимов панели:

а - при проверке защиты от замыканий на землю, подан ток I_b ;
б - при проверке защиты от междуфазных КЗ, поданы токи W2

На рис. 10.7, а приведена диаграмма проверки под нагрузкой реле типа РБМ-271, включенного на ток I_a и напряжение U_{bc}. При направлении активной и реактивной мощности от шин в линию реле с током I_{a1} должно замыкать правые контакты и действовать на отключение W1, реле с током I_{a2} должны замыкать левые контакты и действовать на

Файл скачан с www.turbinist.ru

отключение W2. Проверку под нагрузкой реле направления мощности от замыканий на землю проводят аналогично указанной в § 3.4. Только к реле подводят поочередно токи каждой из фаз от обеих групп ТА. При пропускании тока одной фазы две другие фазы данной группы ТА и все токовые цепи второй группы ТА должны быть закорочены и отключены от панели; не допускается разрыв нулевого провода защиты.

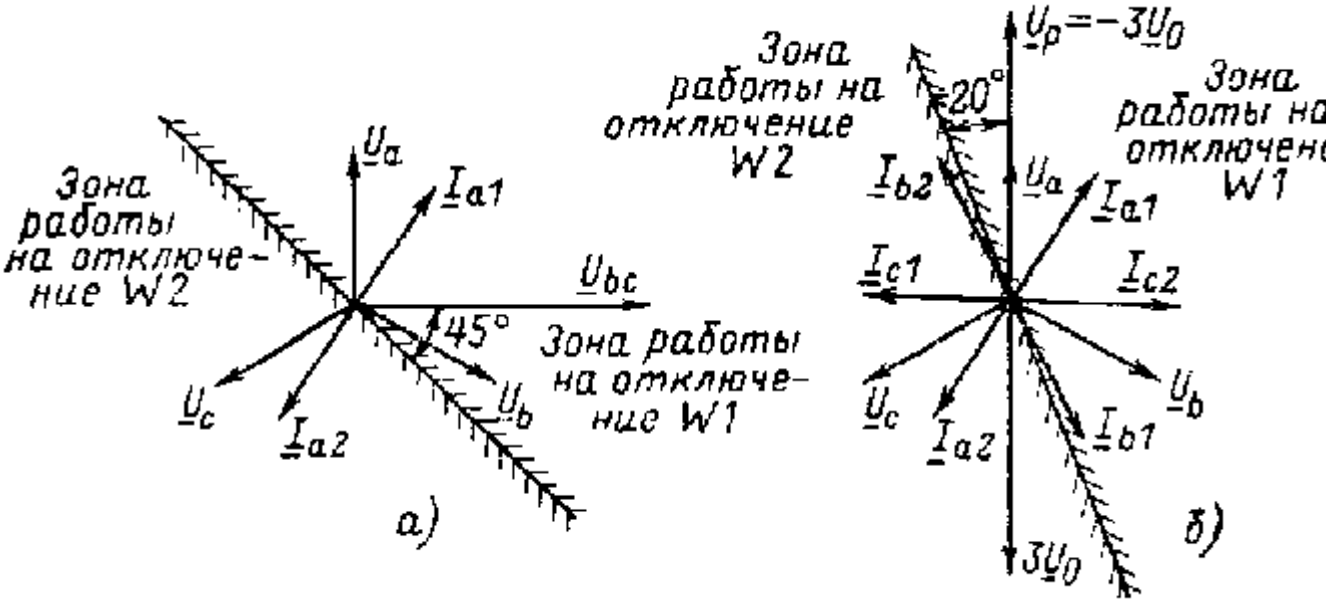


Рис. 10.7.Векторные диаграммы нагрузочного режима с нанесенными зонами срабатывания реле на отключение W1, W2:

а - реле типа РБМ-271, включенное на ток I_a и напряжение U_{bc};
б - реле типа РБМ-278, включенное на $3I_0$ и $3U_0$

На рис. 10.7, б приведена диаграмма проверки под нагрузкой реле типа РБМ-278 при направлении активной и реактивной мощности от шин. Реле с токами I_{a1}, I_{c2}, I_{b1} действует на отключение W1, с токами I_{a2}, I_{c1}, I_{b2} - на отключение W2, при токах I_{b1} и I_{b2} на подвижном контакте можно наблюдать ослабленный момент. При проверках напряжение $3U_0$ на реле следует подавать кратковременно.

После проверки правильности включения реле восстанавливают все цепи тока и напряжения, еще раз контролируют токи небаланса в нулевых проводах и дифференциальных цепях, измеряют напряжение небаланса $3U_0$ на зажимах 9-11 комплекта КЗ 7 и после этого вводят защиту в работу.

При выполнении профилактических работ в процессе эксплуатации необходимо помнить, что при отключении одной из линий и автоматическом выводе защиты из работы на выходное реле другой линии подан оперативный ток цепей отключения.

Раздел одиннадцатый

НАЛАДКА ПРОДОЛЬНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ

Файл скачан с www.turbinist.ru

11.1. Основные технические данные защиты типа ДЗЛ-2

Номинальные значения: а) переменный ток - 5 или 1 А, 100 В, 50 Гц; б) постоянный ток - 110 или 220 В, в) номинальный ток удерживающих обмоток выходного промежуточного реле - 1; 2 или 4 А. Потребляемая мощность: а) цепей переменного тока при номинальном симметричном трехфазном токе - не более 10 В·А на фазу; б) цепей напряжения переменного тока при напряжении 100 В - не более 7 В·А; в) цепей постоянного тока, при напряжении 110 В - не более 8 Вт, при напряжении 220 В - не более 16 Вт.

Все аппараты защиты, в нормальном режиме обтекаемые током, длительно выдерживают 110% номинальных тока и напряжения. По условию термической стойкости защита допускает протекание трехфазного тока, равного 40-кратному номинальному току, в течение 1 с.

Защита имеет две регулировки тока срабатывания:

а) регулировку, характеризуемую коэффициентом h, дающую одновременное пропорциональное изменение тока срабатывания по току прямой и обратной последовательностей;

б) регулировку, характеризуемую коэффициентом k комбинированного фильтра токов $I_1 - kI_2$.

Защита имеет следующие значения коэффициентов h- 1; 1,5; 2, k - 4, 6, 8, 10. Допустимое отклонение коэффициентов h и k от номинального значения - не более ± 8 %. Время действия защиты без выходного промежуточного реле при пятикратном токе срабатывания не превышает 0,04 с. Выходное промежуточное реле KL имеет следующие времена срабатывания: при отключенной тормозной обмотке - 0,008-0,01 с; при включенной тормозной обмотке - 0,05-0,07 с.

В защите предусмотрен быстродействующий автоматический контроль, надежно выводящий защиту из действия при четком обрыве соединительных проводов и токе нагрузки до 6 А включительно при $I_{ном} = 5$ А и до 1,2 А включительно при $I_{ном} = 1$ А. Устройство контроля действует на сигнал при снижении изоляции соединительных проводов относительно земли до 20 кОм и менее. Номинальный ток контроля 5,5 мА. Чувствительность защиты при длине соединительных проводов от 0 до 10 км (что соответствует емкости проводов $C_{пр} = 0 \div 0{,}5$ мкФ и сопротивлению проводов $R_{пр} = 0 \div 700$ Ом) и при одностороннем питании не превышает значений, указанных в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Ток срабатывания защиты при различных видах КЗ и коэффициентах k

Коэффициент k	Вид КЗ и номинальный ток защиты							
	Однофазное		Двухфазное		Трехфазное		Ток обратной последователь-ности	
	1 А	5 А	1 А	5 А	1 А	5 А	1 А	5 А
- 4	0,8	4	0,38	1,9	0,8	4	0,2	1

Файл скачан с www.turbinist.ru

- 6	0,8	4	0,4	2	1,32	6,6	0,22	1,1
- 8	0,8	4	0,43	2,15	1,84	9,2	0,23	1,15
- 10	0,8	4	0,45	2,25	2,5	12,5	0,25	1,25

Примечание. Значения токов срабатывания приведены для h = 1; при h = 1,5; 2 значения, указанные в таблице, умножаются на 1,5 или 2.

На рис. 11.1 дана структурная схема защиты линии, а на рис. 11.2 - принципиальная электрическая схема полукомплекта с блоком А3. Схема второго полукомплекта отличается отсутствием в нем блока А3. Подключение соединительных проводов ко второму полукомплекту показано на рис. 11.2, б.

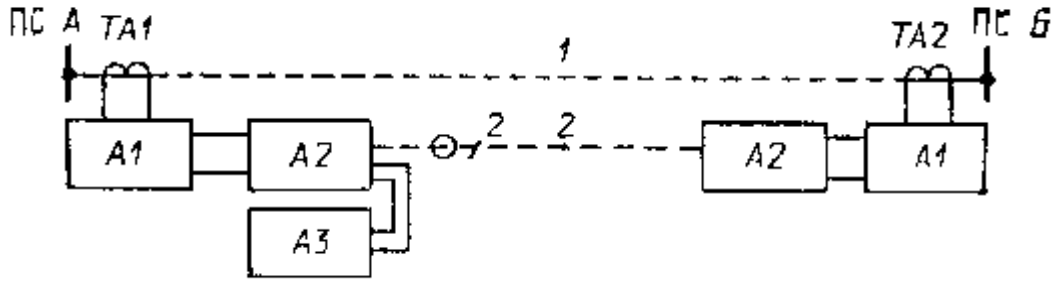


Рис. 11.1. Структурная схема защиты:

ПС А, ПС Б - электрические подстанции; 1 - защищаемая линия;
2 - соединительные провода; ТА1; ТА2 - измерительные трансформаторы тока;
А1 (ДЗЛ-2) - блок измерения и логики; А2 (ЗТИ) - блок изолирующий;
А3 (УК-1) - блок контроля соединительных проводов (в скобках даны заводские обозначения)

Файл скачан с www.turbinist.ru

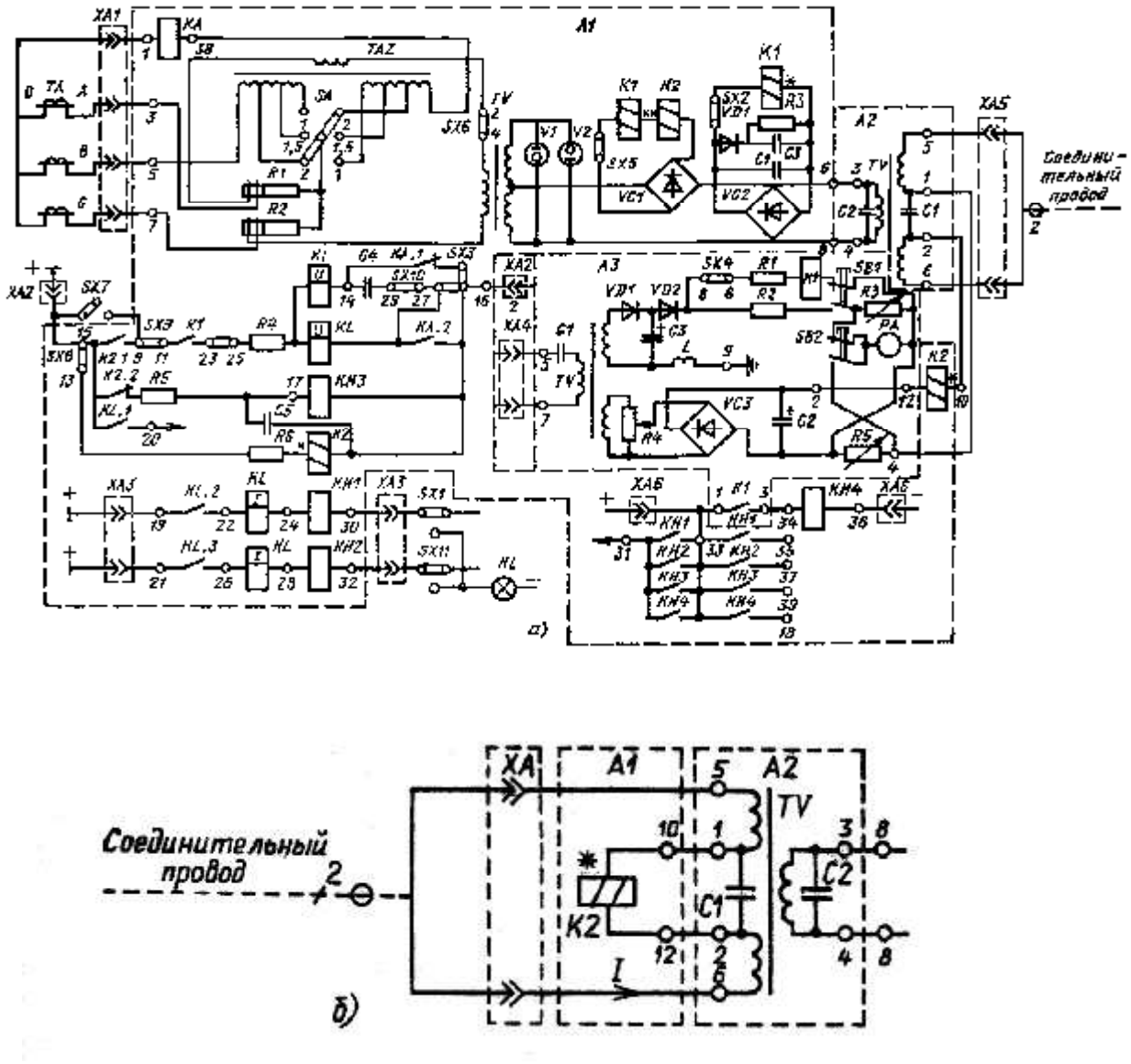


Рис. 11.2. Принципиальная схема (а), подключение соединительных проводов к полукомплекту, не имеющему блока А3 (б):

1 - направление тока контроля; А1 - блок измерения и логики; TAZ (1ТФ) - комбинированный фильтр тока; R1 (1R1), R2 (1R2), R3-R6 (1R5-1R8) - резисторы; TV (1ТП) - промежуточный трансформатор; К1 (1ПР1) - дифференциальное реле; VC1 (1МВ1), VC2 (1МВ2) - выпрямительные мосты; К2 (1ПР2) - реле контроля; KL (1РП) - промежуточное выходное реле; V1 (1СТ1), V2 (1СТ2) - стабилизаторы напряжения; С1 (1С1), С3-С5 (1С3-1С5) - конденсаторы; VD1 (Д) - диод; КА (1РТ) - реле тока; КН1-КН4 (1РУ1-1РУ4) - реле указательные; SX2, SX5 (1Н1, 1Н2), SX6 - испытательные накладки; SX3 (1Н3), SX4 (1Н4), SA, SX8, SX9, SX10 - режимные накладки; А2 - блок изолирующий; TV (3ТИ) - изолирующий трансформатор; С1 (3С1), С2 (3С2) - конденсаторы; А3 (УК-1) - блок контроля соединительных проводов; TV (2ТН) - насыщающийся стабилизированный трансформатор; VD1 (2Д1), VD2 (2Д2) - диоды; VC3 (2МВ) - диодный мост; К1 (2ПР1) - реле контроля; L (2Д) - дроссель; РА - микроамперметр; С1-С3 (2С1-2С3) - конденсаторы; R1-R5 (2R1-2R5) - резисторы; SB 1(2К1), SB2 (2К2) - кнопки; ХА1-ХА6 (12ИБ-17ИБ) - испытательные блоки; SX1, SX7, SX11 (9Н-11Н) - оперативные накладки; HL - сигнальная лампа (в скобках даны заводские обозначения)

11.2. Проверка элементов схемы защиты

Файл скачан с www.turbinist.ru

Для проверки подается ток от постороннего источника на вход блока А1 (рис. 11.3). Во избежание перегрева и выхода из строя TAZ, R1, R2 подаваемый ток при всех проверках не должен превышать 7 $I_{ном}$. Ток срабатывания поляризованных реле К1, К2 блока А1 должен быть 2,4-2,5 мА $\pm$10%, коэффициент возврата 0,4-0,5 $\pm$10%. При подаче тока 22-24 мА в тормозную обмотку реле $К_1$ - ток срабатывания его возрастает до 4,1 мА $\pm$10 %. Ток срабатывания реле К1 блока А3 должен составлять 0,8 мА, ток возврата 0,2-0,5 мА. Допускаются отклонения $\pm$10%. Регулировка поляризованных реле, реле тока, промежуточных и указательных осуществляется по общепринятой методике (см. разд. 2).

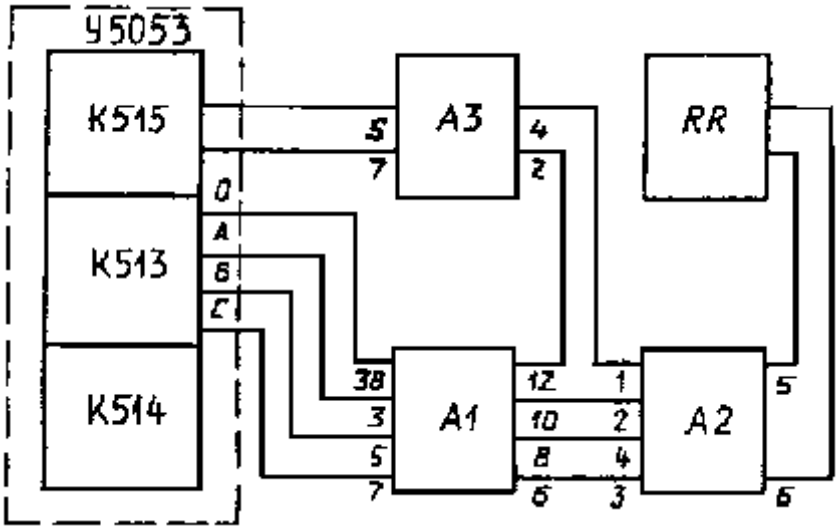


Рис. 11.3. Подключение проверочного устройства типа У5053 к полукомплекту защиты:

К513, К514, К515 - блоки проверочного устройства; RR - реостат типа РПС на 1000 Ом или магазин сопротивлений типа Р-33

Напряжение зажигания и правильность включения стабилизаторов напряжения V1, V2 проверяются по схеме рис. 11.4. Для этого на входные зажимы 3-7 блока А1 подается ток от проверочного устройства У5053 или УПЗ-2. На выводы стабилизаторов напряжения подключаются вольтметр с большим внутренним сопротивлением и осциллограф. Напряжение зажигания фиксируется по началу искажения синусоиды напряжения и должно быть в пределах 100-110 В. Форма среза синусоиды при правильном включении стабилизаторов показана на рис. 11.5, а, при неправильном - на рис. 11.5, б.

Файл скачан с www.turbinist.ru

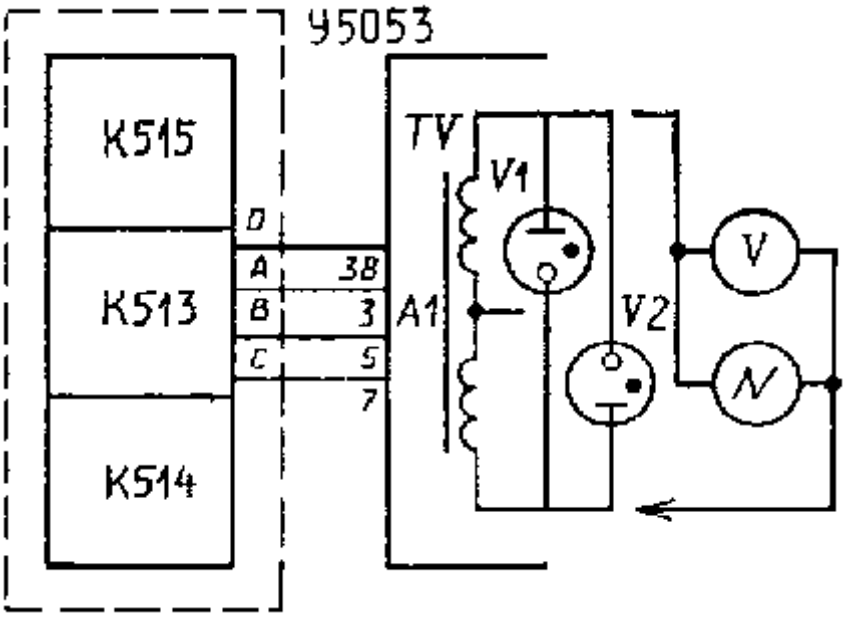


Рис. 11.4. Подключение проверочного устройства типа У5053 к полу-комплекту защиты для проверки стабилизаторов напряжения:

V - вольтметр; N - осциллограф

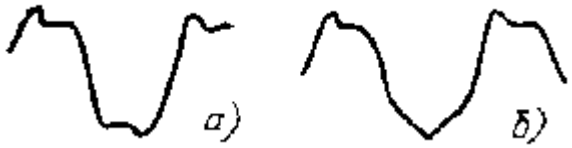


Рис. 11.5. Искажение формы синусоидального напряжения стабилизаторами напряжения:

а - при правильном включении стабилизаторов; б - при неправильном включении стабилизаторов

Для проверки коэффициента k на вход TAZ (зажимы 3-7) блока A1 (рис. 11.6) подается ток I_{AC}, равный 0,4 $I_{ном}$. На выходе TAZ (зажимы 2-4) перемычки SX6 измеряется напряжение электронным вольтметром. Затем на вход (зажимы 5-38) подается такой ток I_{B0}, чтобы напряжение на выходе было равно предыдущему.

Файл скачан с www.turbinist.ru

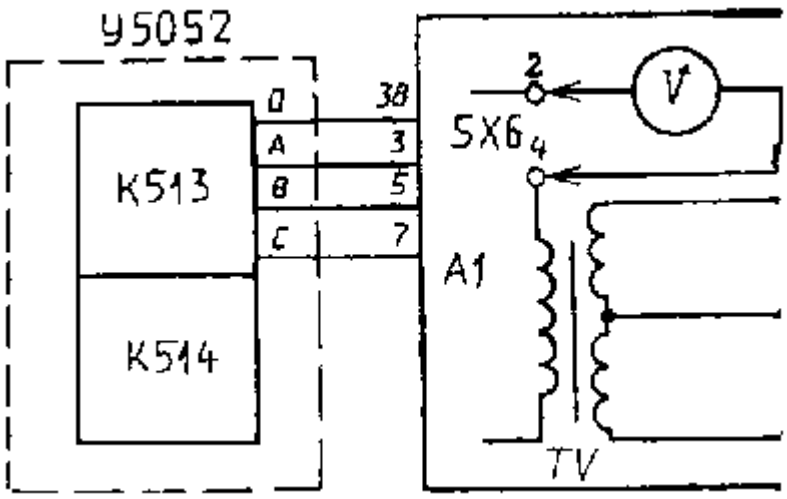


Рис. 11.6. Подключение проверочного устройства типа У 5052 к полукомплекту защиты для проверки коэффициента k

Коэффициент k определяется по формуле

$$k = \frac{\sqrt{3}I_{AC} + I_{B0}}{\sqrt{3}I_{AC} - I_{B0}}.$$

11.3. Проверка соединительных проводов и устройств контроля

Изоляция проводов проверяется мегомметром на 500 В и должна удовлетворять соответствующим нормам (см. разд. 2). Для измерения сопротивления проводов $R_{пр}$ они закорачиваются с одной стороны и на них подается напряжение постоянного тока не более 220 В через амперметр; $R_{пр}$, Ом, определяется по выражению

$$R_{пр} = U_{пр}/I_{пр},$$

где $U_{пр}$ - подаваемое напряжение, В; $I_{пр}$ - ток в проводах, А.

Плотность тока для медного провода не должна превышать 1 А/мм^2 во избежание нагрева. Для измерения емкости проводов $C_{пр}$ провода раскорачивают и на них подается переменное напряжение не более 220 В, 50 Гц, через миллиамперметр. Емкость, мкФ, определяется по выражению

$$C_{пр} = \frac{I_{пр} \cdot 10^3}{314U_{пр}},$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

где $I_{пр}$ - ток, мА; $U_{пр}$ - напряжение, В.

Определение емкости проводов необходимо для оценки чувствительности защиты по табл. 11.1 и изготовления эквивалента проводов.

Производится градуировка микроамперметра РА блока А3 по двум изменяющимся параметрам: сопротивлению изоляции проводов по отношению к земле и току контроля соединительных проводов.

Градуировка производится по схеме, показанной на рис. 11.2. Для регулировки по первому параметру при поданном на вход блока А3 напряжении 100 В, закороченных зажимах 4-9 и нажатой кнопке SB1 резистором R3 устанавливается максимальное показание прибора. Затем на зажимы 4-9 подключается магазин сопротивлений типа Р-33 и снимается зависимость показаний прибора от сопротивления. При отпущенной кнопке отмечается сопротивление, при котором срабатывает реле контроля К1. Оно должно быть меньше или равно 20 кОм.

Для градуировки но второму параметру между зажимами 2-4 включается сопротивление 3 кОм последовательно с контрольным миллиамперметром. Регулируя переменный резистор R4, устанавливают ток по контрольному прибору, равный 5,5 мА. Резистором R5 при нажатой кнопке SB2 устанавливают показание микроамперметра, равное 55 делениям.

11.4. Комплексная проверка

Для комплексной проверки защиты изготавливают эквивалент соединительных проводов (рис. 11.7), имеющий параметры $R=R_{пр}/4$, $C\text{-}C_{пр}$; оба полукомплекта доставляют в одно место и соединяют через эквивалент. Чувствительность защиты к разным видам замыканий проверяется по схеме, показанной на рис. 11.8. Для имитации замыкания, например на фазе А, соединяется зажим 38 блока А1 первого полукомплекта с зажимом 3 блока А1 второго полукомплекта. От устройства проверки защит типа У5053 подается ток на зажим: 3 блока А1 первого полукомплекта и 38 блока А1 второго полукомплекта.

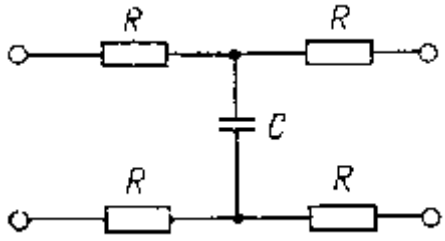


Рис. 11.7. Эквивалент соединительных проводов

Файл скачан с www.turbinist.ru

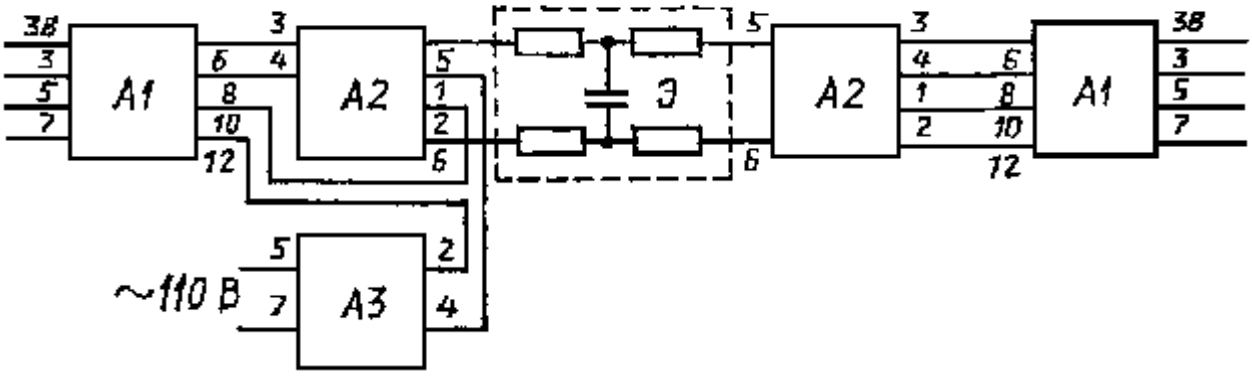


Рис. 11.8. Схема для комплексной проверки защиты:

А1 - блок измерения и логики; А2 - блок, изолирующий; А3 - блок контроля соединительных проводов; Э - эквивалент проводов

Фиксируется срабатывание дифференциального реле К1 при увеличении тока. Аналогично собирается схема для проверки чувствительности защиты к замыканиям других фаз, а также к двухфазным замыканиям.

Результаты проверок чувствительности сравниваются с данными табл. 11.1 с учетом установленных коэффициентов h и k, а также параметров соединительных проводов. По этой же схеме производится измерение времени срабатывания защиты.

После установки полукомплектов по разным концам линии с помощью R4 регулируется ток контроля соединительных проводов до 5,5 мА (55 делений по встроенному прибору). Устанавливать большее значение тока контроля не рекомендуется, так как при этом будет увеличиваться время возврата реле контроля К2 блока А3.

11.5. Проверка защиты рабочим током и напряжением

С помощью рабочего тока производится фазировка защиты. Для этого с каждой стороны линии на один и тот же входной зажим, например 5, TAZ блока А1 поочередно подают фазы токовых цепей АВС-0, отсоединяя и закорачивая остальные. Вольтметром с большим входным сопротивлением измеряется напряжение на зажимах соединительных проводов.

При совпадении фаз и правильном подключении соединительных проводов напряжение должно быть в пределах 0-4 В, а ток в рабочей обмотке дифференциального реле К1 - около 0. Напряжение измеряется также при перекрещенном подключении соединительных проводов. Значение напряжения зависит от угла между векторами токов, подаваемых в одноименные зажимы TAZ блоков А1. Переключение проводов равнозначно повороту подключаемой фазы на 180°.

На ВЛ с отпайками и на кабельных линиях одноименные векторы тока по концам линии развернуты менее чем на 180° из-за влияния нагрузки отпайки или емкостного сопротивления кабеля. При фазировке защиты отпайку желательно отключить. Одноименность векторов тока во всех случаях определяется путем снятия векторных диаграмм прибором типа ВАФ-85 и их сравнения с показаниями приборов, контролирующих перетоки мощностей по концам линии. После определения наименований фаз токовых цепей с двух сторон линии они подключаются к одноименным зажимам TAZ блоков А1.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Для проверки коэффициента k на вход TAZ блока A1 подается симметричная трехфазная система токов ABC-0 прямой, затем обратной последовательности ACB-0. Электронным вольтметром измеряется напряжение на разомкнутой обмотке TV блока A1 (при снятой перемычке SX6). Отношение напряжения, показываемого вольтметром при обратном чередовании фаз токов на входе TAZ, к напряжению при прямом чередовании должно быть равно коэффициенту k $\pm$ 8 %.

Проверяется действие реле К2 контроля соединительных проводов при их обрыве и замыкании. При обрыве проводов должны сработать реле К2 блоков A1 обоих полукомплектов, при замыкании проводов между собой - реле К2 блока A1 полукомплекта, не имеющего блока контроля A3. Замыкание соединительных проводов на землю имитируют, соединяя поочередно жилы проводов с контуром заземления. При этом должны сработать реле К1 блока A3 и указательное реле КН4.

Раздел двенадцатый

НАЛАДКА СПЕЦИАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ МОЩНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ

12.1. Устройство защиты от замыканий на землю систем возбуждения генераторов типа КЗР-3

Устройство КЗР-3 обеспечивает защиту от замыканий на землю в одной точке цепи возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов с электромашинной, тиристорной, высокочастотной и ионной системами возбуждения. Использование защиты предусмотрено на гидрогенераторах, турбогенераторах с водяным охлаждением ротора и на всех турбогенераторах мощностью 300 мВт и выше. На гидрогенераторах защита действует на отключение, на турбогенераторах - на сигнал (для принятия оперативных решений).

Действие защиты основано на наложении переменного напряжения частотой 25 Гц на цепи возбуждения и измерении активной составляющей переменного тока, определяемой значением сопротивления изоляции цепей ротора относительно земли. Основные элементы и цепи защиты приведены на схеме рис. 12.1.

Файл скачан с www.turbinist.ru

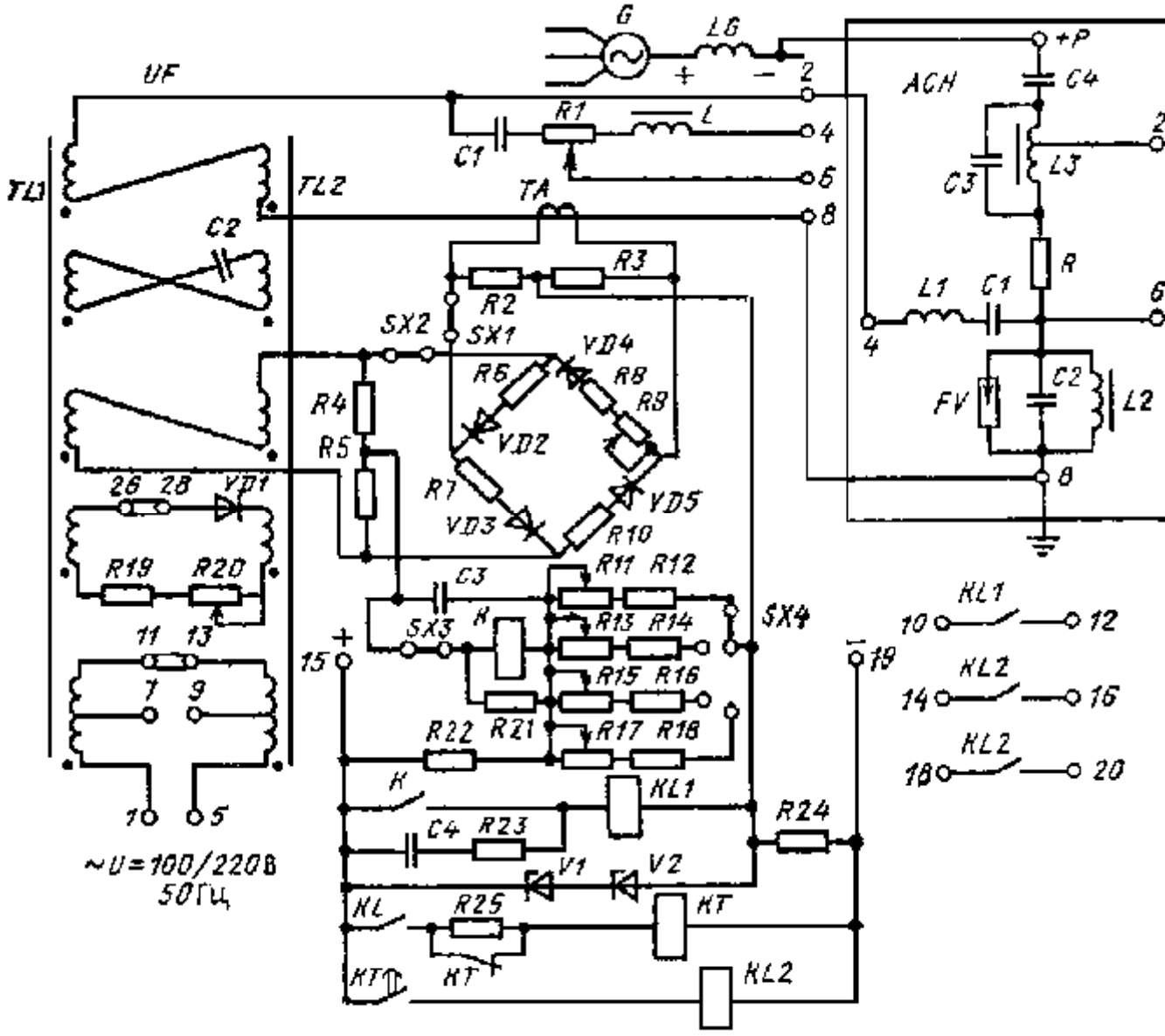


Рис 12.1. Устройство защиты типа КЗР-3 и схема его подключения к цепям возбуждения через вспомогательное устройство АСН

Источником напряжения 25 Гц является магнитный делитель частоты UF, преобразующий напряжение промышленной частоты 50 Гц и состоящий из двух магнитных сердечников TL1 и TL2. На сердечниках расположены обмотки питания делителя, выведенные на зажимы 1-5 комплекта, на которые подается напряжение 220 В частотой 50 Гц при установленной перемычке 11-13 или напряжение 100 В частотой 50 Гц при перемычке 7-9. Для надежности защиты рабочее и резервное питание выполняют со сборок 0,4 кВ, запитанных от различных секций.

На этих же сердечниках расположены обмотки подмагничивания в цепи которых установлены диод VD1 и резисторы R19 и R20, служащие для ограничения и регулирования тока подмагничивания, и обмотки, в цепи которых включен конденсатор С2, и которые образуют с ним колебательный контур частотой 25 Гц; две пары обмоток, соединенные согласно-последовательно, являются нагрузочными. С одной пары обмоток напряжение 25 Гц подается для наложения на цепи возбуждения генераторов, со второй - в измерительные цепи защиты.

Файл скачан с www.turbinist.ru

У генераторов, имеющих однотипное электромашинное рабочее и резервное возбуждение, вспомогательное устройство АСН не используется, в этом случае к цепи ротора подключается вывод 4 комплекта КЗР-3, вывод 8 всегда надежно заземляется. В настоящее время электромашинное возбуждение используется в основном как резервное, высокочастотное или тиристорное - как рабочее возбуждение, когда применение АСН обязательно; для исключения дополнительного усложнения защиты при переходе с рабочего на резервное электромашинное возбуждение АСН оставляется в работе.

Переменный ток 25 Гц через вспомогательное устройство подают на обмотку ротора LG и на землю (на вал генератора через заземляющую щетку), для этого соединяют зажим 2 комплекта КЗР-3 и зажим 4 АСН, зажимы 8 заземляют. В заводской документации указывается подключение АСН к положительному полюсу цепей ротора (зажим обозначается “+Р”), для тиристорной системы возбуждения в связи с конструктивными особенностями ее водяной системы охлаждения подключение выполняют на отрицательный полюс как имеющий более низкую изоляцию.

Вспомогательное устройство АСН состоит из L-C-фильтров предотвращающих попадание в защиту напряжения частотой 50-150-300 Гц и выше из тиристорной и высокочастотной систем возбуждения. Фильтры настроены на резонансную частоту: L1-C1 - последовательный 25 Гц; L3-C23 - параллельный 25 Гц; L3-C4 - последовательный 25,5 Гц; L3-C3 - параллельный 50 Гц. Конденсаторы С1 и С4 отделяют цепи защиты от цепей возбуждения для исключения дополнительного подмагничивания сердечников Т1 и Т2 постоянным током, резистор R ограничивает протекающий ток при металлическом КЗ в одной точке. При электромашинном возбуждении аналогичные функции выполняют включенные в цепь зажима 4 комплекта КЗР-3 элементы С1, R1, L. Разрядник FV служит для защиты измерительной цепи комплекта при возникновении перенапряжений.

Наложенный ток имеет две составляющие - активную и емкостную, определяемые значением активного сопротивления изоляции и емкостью цепей возбуждения относительно земли. Уровень изоляции характеризуется значением активной составляющей тока, для ее выделения в устройстве КЗР-3 применяется симметричная кольцевая фазочувствительная схема с двумя входами, при которой на один вход от вторичной обмотки трансформатора тока ТА с делителем напряжения R2-R3 со средней точкой подается наложенный ток 25 Гц, на другой вход с аналогичным делителем 4R-5R подается напряжение 25 Гц с отдельных нагрузочных обмоток UF.

Фазочувствительная схема состоит из диодов VD2-VD5, балластных резисторов R6-R10, регулировочный резистор R9 служит для балансирования схемы, чтобы при подаче на ее вход одной из сравниваемых величин ток в нагрузке равнялся нулю. Нагрузка с исполнительным реле К включена на выводы от средних точек делителей напряжения.

Напряжение на фазочувствительной схеме от UF - управляющее (открывает и закрывает диоды одного плеча). По величине оно значительно больше, чем управляемое напряжение от вторичной обмотки ТА, которое определяет протекание тока через один из открытых диодов. При работе схемы среднее значение напряжения выхода пропорционально только значению активного тока, определяемого сопротивлением изоляции [4]. В реальных условиях наличие в АСН конденсаторов С1, С4, емкость которых не может быть абсолютно точно компенсирована индуктивностью дросселей L1 и L3, и наличие в цепи активных сопротивлений обмоток дросселей и ограничительного резистора R приводит к изменению чувствительности комплекта защиты при изменении емкости цепей возбуждения генератора. Чувствительность защиты при изменении емкости цепей во многом определяется точностью настройки колебательных контуров.

Напряжение на выходе фазочувствительной схемы сравнивается со стабилизированным напряжением делителя, включенного на оперативный постоянный ток. Делитель состоит из резистора R22 и резисторов R11-R12; R13-R14; R15-R16; R17-R18, обеспечивающих четыре возможные уставки защиты: 10 кОм и 5 кОм при электромашинном возбуждении, 5 кОм и 2,5 кОм при высокочастотном и тиристорном возбуждении.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Исполнительным органом схемы сравнения является высокочувствительное магнитоэлектрическое реле (МЭР) типа М 237/054, позволяющее получить четкое срабатывание и высокий коэффициент возврата (см. разд. 8). Напряжение на контактах МЭР допускается не более 120 В, поэтому они включены в цепи напряжения, стабилизированного на уровне 66 ± 10 В, что достигается последовательным включением стабилитронов V1-V2 и балластного резистора R24 (это же напряжение подается в схему сравнения).

При проверке защиты перед наладкой на отсутствие дефектов, которые могут возникнуть при транспортировке, особое внимание следует обратить на надежность крепления зажимов на задней панели и надежность пайки всех элементов вспомогательного устройства АСН, так как оно обычно устанавливается на горизонтальной плоскости в одной из сборок цепей возбуждения, где доступ к нему в процессе эксплуатации значительно затруднен (сложно снять крышку), во время работы генератора доступ к элементам вспомогательного устройства практически невозможен. При проверке защиты необходимо контролировать частоту питающей сети, так как уставка срабатывания существенно от нее зависит. При изменении частоты питающего напряжения на ± 2 % сопротивление срабатывания защиты может изменяться по отношению к сопротивлению срабатывания при номинальной частоте 50 Гц; в случае тиристорного возбуждения на уставках 5 кОм и 2,5 кОм до 35 % это может служить причиной значительного изменения уставок при контрольных и сдаточных проверках.

Проверка электрических характеристик комплекта и вспомогательного устройства. Проверка настройки магнитного делителя частоты производится при номинальном напряжении питания частоты 50 Гц по значению тока подмагничивания, измеряемого миллиамперметром в рассечке 26-28. Ток подмагничивания должен составлять 230+10 мА, регулировка его осуществляется с помощью резистора R20. Настройка фазочувствительной схемы производится при отключенном постоянном оперативном токе и отключенных от комплекта защиты цепях возбуждения (зажимы 2, 4, 6, 8 свободны).

При поданном номинальном напряжении питания микроамперметром с внутренним сопротивлением не более 1000 Ом проверяется отсутствие постоянного тока в цепи перемычки SX3, перемычка SX4 должна занимать положение, соответствующее рабочей уставке. Если при соблюдении всех перечисленных условий в цепи SX3 протекает постоянный ток, то он уменьшается до нуля регулировкой переменного резистора R9, осуществляющего балансировку схемы кольцевого модулятора.

Проверка схемы оперативного тока. Оперативный ток на защиту подают с соблюдением полярности, измерением напряжения между зажимом 15 и накладкой SX4 контролируют напряжение стабилизации, которое должно быть 56-76 В. Если измеренное напряжение не укладывается в норму, проверяют распределение напряжения между стабилитронами, сопротивление резистора R24; неисправные элементы заменяют. Проверку МЭР производят в соответствии с рекомендациями, приведенными в разд. 8.

Реле постоянного тока KL1, KL2 и КТ проверяют в соответствии с указаниями завода-изготовителя, реле KL1, включенное на стабилизированное напряжение, должно срабатывать при напряжении не более 45 В.

Проверку настройки частотных фильтров, как правило, производят, если были выявлены существенные дефекты, связанные с ослаблением крепления пластин шлихтованных сердечников дросселей или заменялись отдельные конденсаторы. Настройка обязательно ведется через магнитный делитель частоты при подаче на него номинального напряжения и с контролем частоты по частотомеру. Потребление цепи питания 55 В·А, поэтому если для проверки используется генератор частоты, он должен обеспечивать необходимую мощность без существенных искажений.

Контур С1-L комплекта КЗР-3 настраивается при параллельно включенных на зажимы 4-8 резисторе сопротивлением 10 кОм и конденсаторе емкостью 1 мкФ по распределению напряжений на С1 и L (рис. 12.2). При частоте питания 50 Гц напряжение на конденсаторе С1 должно на 15% превышать напряжение на дросселе L, при этом измерения производят вольтметром с сопротивлением не менее 1000 Ом/В, настройку - изменением зазора в сердечнике дросселя.

Файл скачан с www.turbinist.ru

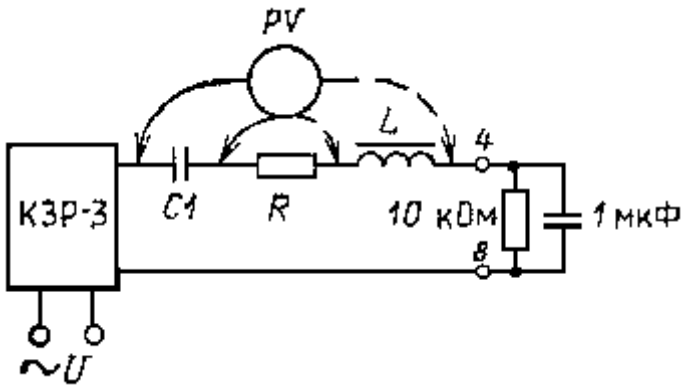


Рис. 12.2. Схема настройки С1-L фильтра комплекта КЗР-3

Резонансный контур С3-L3, С4 вспомогательного устройства настраивается по схеме, показанной на рис. 12.3, а, на минимум показания напряжения вольтметра PV при частоте питания 51 Гц изменением зазора в сердечнике дросселя L3 (при измерениях миллиамперметр РА из схемы исключен). По этой же схеме, но при частоте питания 50 Гц по минимуму тока в цепи между зажимами 8 комплекта КЗР-3 и АСН настраивается контур С2-L2 изменением зазора в сердечнике дросселя L2 (при проверке вольтметр PV отключен).

При настройке и проверке данных контуров измерения напряжений и токов производятся в цепях переменного тока частотой 25 Гц, а это накладывает на измерительные приборы дополнительные требования по их частотному диапазону применения. Для измерения напряжения следует применять переносные комбинированные электронные приборы типа ВК26 (ранее выпускались ВК7-9; ВК7-15 и др.), обеспечивающие измерение напряжений с 20 Гц.

При проверке контура С2-L2 можно обойтись без миллиамперметра, работающего на пониженной частоте, если в цепь между зажимами 8 (КЗР-3 и АСН) включить балластный резистор $R_б$ сопротивлением 3-5 Ом и измерять на нем напряжение (рис. 12.3, б). Вместо измерительного прибора можно использовать электронно-лучевой осциллограф, который позволяет наглядно контролировать напряжение элементов схемы; при необходимости можно сравнить измеряемые величины с калиброванным сигналом.

Файл скачан с www.turbinist.ru

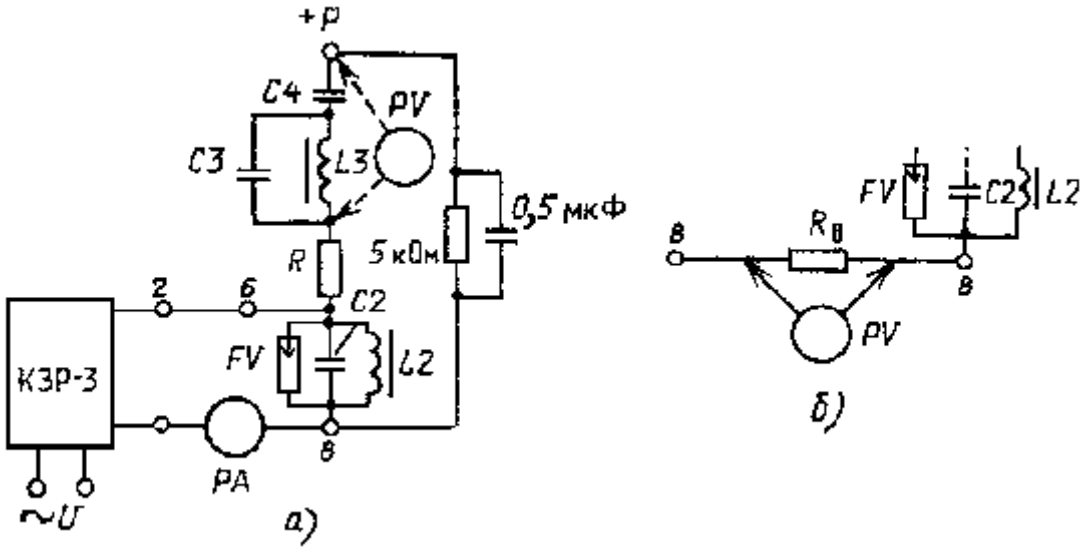


Рис. 12.3. Схемы настройки частотных фильтров вспомогательного устройства АСН

а - с использованием вольтметра PV и миллиамперметра РА;
б - с использованием одного вольтметра PV

В исключительных случаях, при отсутствии необходимого вольтметра или осциллографа все измерения можно производить и оценивать качественно на минимум тока и максимум-минимум напряжения распространенными комбинированными приборами типа Ц4315, Ц4352 и другими приборами, имеющими нижний диапазон частоты 45 Гц.

При проверке контура L1-C1 соединительный провод с зажима 6 устройства АСН переключают на зажим 4, вольтметром измеряют распределение напряжений на С1 и L1, при этом напряжение на дросселе должно быть на 2-5 % больше, чем на конденсаторе, а настройку производят изменением зазора сердечника дросселя.

Настройку рабочей уставки производят при полностью собранных силовых цепях возбуждения, установленных щетках на валу ротора турбогенератора (включенной схеме водяного охлаждения для тиристорной системы возбуждения) и при напряжении питания, поданном по проектной схеме. Перед проверкой проверяют мегомметром сопротивление изоляции цепей возбуждения.

В соответствии с требованиями директивных указаний сопротивление изоляции в собранной схеме при новом включении не должно быть ниже 0,5 мОм, для тиристорной системы возбуждения с водяным охлаждением при допустимом удельном сопротивлении дистиллята сопротивление изоляции может быть ниже и достигать 200-300 кОм. Сопротивление изоляции во время эксплуатации почти на два порядка выше, чем требуемая уставка срабатывания КЗР-3, которая принимается:

у турбогенераторов с газовым охлаждением обмотки ротора и элементов возбуждения - примерно 8 кОм;

у турбогенераторов с водяным охлаждением обмотки ротора или выпрямителей рабочей системы возбуждения, а также с водяным охлаждением и обмотки, и выпрямителей - до 2; 5 кОм;

у турбогенераторов ТГВ-500 с водяным охлаждением обмотки ротора - до 7,5 кОм.

Можно рекомендовать следующий метод настройки, позволяющий не учитывать шунтирующий эффект сопротивления изоляции системы возбуждения. Магазин сопротивления

Файл скачан с www.turbinist.ru

РЗЗ подключают между контуром заземления и поочередно обоими полюсами цепей возбуждения, настройку $R_{ср}$ производят при реальной емкости шин одним из регулированных резисторов R11, R13, R15, R17 при заданном сопротивлении $R_{ср}$, установленном на РЗЗ. Если имеется отличие в $R_{ср}$ при подключении магазина к различным полюсам, настройку уставки производят для случая меньшего сопротивления. После настройки рабочей уставки стопорной гайкой фиксируется положение регулировочного резистора.

Таблица 12.1. Обозначения элементов устройства защиты типа КЗР-3

Цепи переменного тока, напряжения		Цепи оперативного постоянного тока		Цепи вспомогательного устройства	
в справочнике	в схемах завода-изготовителя	в справочнике	в схемах завода-изготовителя	в справочнике	в схемах завода-изготовителя
UF	МДЧ	KL1	1РП	АСН	ВУ2
TL1, TL2	1ТП, 2ТП	KL2	2РП	С1-С4	1С-4С
VD1-VD5	1Д-5Д	КТ	РВ	L1-L3	1L-3L
С1-С4	1С-4С	К	РТ	FV	Р3
V1, V2	1СТ, 2СТ	SX1-SX4	1Н-4Н		
L	Др				

Примечание. На заводской схеме резисторы имеют цифровой индекс перед буквенным обозначением от 1R до 25R, на схеме рис. 12.1 аналогичный цифровой индекс - после.

Многократным изменением в полной схеме сопротивления мостом в сторону увеличения R определяют $R_в$, при уменьшении повторно проверяют $R_{ср}$, по измеренным величинам определяют $k_в$, который должен быть не более 2:

$$k_в = \frac{R_в}{R_{ср}} \le 2.$$

При опыте металлического КЗ цепей возбуждения в одной точке не только проверяется надежность работы, но и измеряется ток в накладке SX3, так как в этом случае он максимальный на срабатывание МЭР. При работе генератора в системе на рабочем и резервном возбуждении измеряются реальные тормозные токи МЭР в накладке SX3, проверяется действие сигнализации. Для удобства работы с заводской документацией обозначения соответствующих элементов приведены в табл. 12.1.

Файл скачан с www.turbinist.ru

12.2. Блок-реле защиты типа ЗЗГ-1

Блок-реле типа ЗЗГ-1 применяется в схемах защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов мощностью 160 МВт и более, работающих в блоке с трансформаторами при наличии в нейтрали дополнительного трансформатора напряжения. Схема подключения защиты к цепям напряжения приведена на рис. 12.4, принципиальная схема комплекта блок-реле - на рис. 12.5 [4, 5].

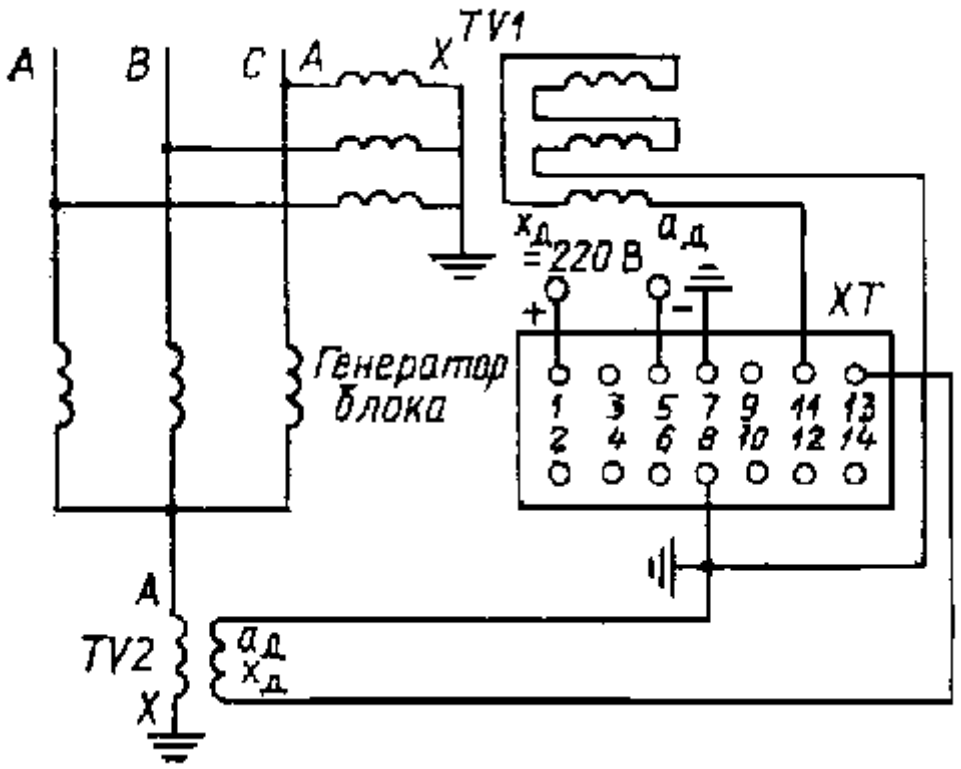


Рис. 12.4. Схема подключения блок-реле типа ЗЗГ-1 к цепям напряжения

Файл скачан с www.turbinist.ru

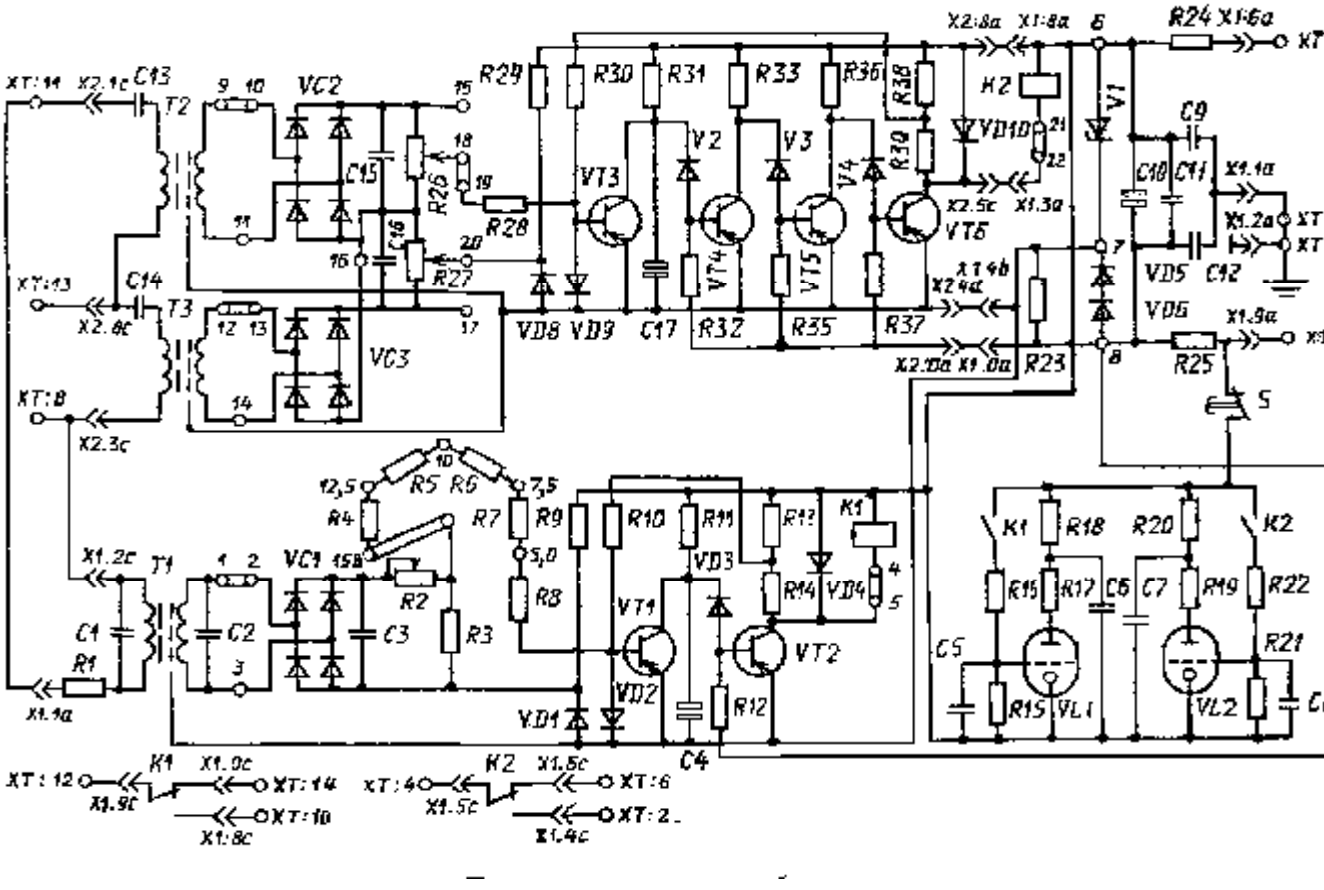


Рис. 12.5. Принципиальная схема блок-реле типа ЗЗГ-1

Комплект состоит из двух реле, обеспечивающих защиту обмотки статора без зоны нечувствительности: реле максимального напряжения основной гармоники, которое реагирует на напряжение промышленной частоты и включается на напряжение обмоток TV1, соединенных по схеме разомкнутого треугольника (реле обеспечивает защиту 85-95 % обмотки статора со стороны фазных выводов), и реле напряжения третьей гармоники с торможением, предназначенного для работы при замыкании на землю вблизи нейтрали - в зоне, где первое реле не обладает достаточной чувствительностью.

Входной фильтр максимального напряжения R1-C1-T1-C2 настроен на частоту 50 Гц и имеет на этой частоте максимальное сопротивление, в этом случае большая часть напряжения $3U_0$ приложена к первичной обмотке T1, входные зажимы реле XT: 8, XT: 11. При подведении к фильтру напряжения третьей гармоники сопротивление фильтра резко уменьшается, большая часть напряжения частотой 150 Гц при этом оказывается приложенной к резистору R1; загрубление реле при частоте 150 Гц и выше составляет не менее 8 по отношению к напряжению срабатывания промышленной частоты.

Напряжение со вторичной обмотки T1 выпрямляется, сглаживается конденсатором C3 и через резисторы плавно-ступенчатого регулирования уставки подается на вход двухкаскадного усилителя, собранного на двух транзисторах VT1, VT2. Ступенчатое регулирование уставки 15 : 12,5 : 10 : 7,5 : 5,0 В осуществляется изменением набора резисторов R4-R7 на переключателе, резистор R2 обеспечивает плавную регулировку в пределах диапазона. Диод VD3, включенный на вход выходного транзистора VT2, обеспечивает релейный режим его работы, конденсатор C4 улучшает помехоустойчивость реле. Исполнительный орган реле K1, включенный в цепь коллектора VT2, выполнен на базе промежуточного реле РП-220.

Принцип действия второго реле, предназначенного для работы при замыкании на землю вблизи нейтрали, основан на сравнении напряжений третьей гармоники на фазных выводах

Файл скачан с www.turbinist.ru

генератора и в нейтрали. В нормальном режиме векторы третьей гармоники по концам обмоток статора со стороны нейтрали $\underline{U}_н$ и выводов $\underline{U}_в$ равны по величине и находятся в противофазе, потенциал напряжения третьей гармоники в середине обмотки генератора равен нулю (рис. 12.6), т.е. $\underline{U}_н = \underline{U}_в = 0{,}5\,E_3$; $\underline{U}_c = 0$.

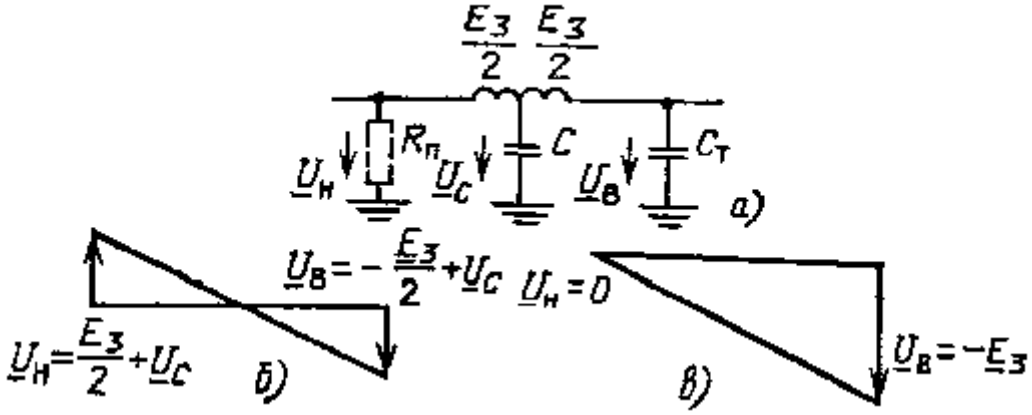


Рис. 12.6. Напряжение третьей гармоники в обмотке статора генератора:

а - схема замещения; б - распределение напряжения третьей гармоники вдоль обмотки в нормальном режиме; в - то же при замыкании на землю нейтрали генератора; С - емкость обмотки генератора; $C_т$ - емкость шин генераторного напряжения и обмоток трансформаторов блока и собственных нужд; $R_п$ - переходное сопротивление в месте КЗ; E_3 - ЭДС третьей гармоники;
$U_н$, $U_в$ - напряжения третьей гармоники на нейтрали и выводах генератора; U_c - напряжение третьей гармоники на емкости обмотки генератора

На вход рабочей цепи (выводы XT : 11-XT : 13 на рис. 12.5) подается сумма векторов напряжений - модуль $|\underline{U}_н + \underline{U}_в|$; на вход цепи торможения (выводы XT : 8-XT : 13) - напряжение $|\underline{U}_н|$. В нормальном режиме (без замыкания на землю) в обмотке суммарное напряжение $|\underline{U}_н + \underline{U}_в|$ близко к нулю и напряжение тормозного контура надежно удерживает реле от срабатывания.

При замыкании в нейтрали напряжение на входе тормозного контура отсутствует, суммарное напряжение рабочей цепи $|\underline{U}_н + \underline{U}_в|$ становится равным E_3 и реле надежно срабатывает.

При замыкании на выводах одной из фаз напряжение $\underline{U}_в$ становится равным нулю, напряжения рабочих и тормозного контура в этом случае примерно равны и действие реле зависит от коэффициентов пропорциональности напряжений контуров, вводимых в схему. Для выполнения в нормальном режиме условия $|\underline{U}_в + \underline{U}_н| = 0$ номинальное напряжение TV1, установленного на выводах генератора, должно быть: первичной обмотки - соответствующим фазному номинальному напряжению генератора, а вторичных обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник, - 100/3 В. Номинальное напряжение вторичной обмотки TV2, установленного в нейтрали при идентичных параметрах первичной обмотки, должно быть 100 В.

Файл скачан с www.turbinist.ru

На входе рабочей и тормозной цепей установлены фильтры Т2-С13, Т3-С14, настроенные на частоту 150 Гц (см. рис. 12.5). Выпрямленные напряжения рабочей и тормозной цепей сглаживаются емкостями С15, С16 и подаются на резисторы R26, R27 плавного регулирования коэффициента торможения $k_т$. Под коэффициентом торможения реле понимается отношение рабочего напряжения U_{8-11} к тормозному напряжению U_{8-13} в условиях срабатывания. Реле обеспечивает диапазон регулирования $k_т$ в пределах 0,33-3. В связи с малыми величинами входных сигналов принята четырехкаскадная схема усиления, когда в нормальном режиме VT3, VT5 открыты, VT4, VT6 закрыты. Исходный режим усилителя определяется работой VT3 в открытом режиме за счет начального отрицательного смещения потенциала базы TV3 диодом VD8.

Напряжение, приложенное к резистору R27 и пропорциональное $I\underline{U}_н I$ является тормозным; напряжение, приложенное к резистору R26 и пропорциональное $I\underline{U}_в + \underline{U}_н I$, является рабочим. Тормозное напряжение, понижая потенциал базы триода VT3, способствует более полному его открытию, при уменьшении тормозного напряжения повышается потенциал базы триода от рабочего напряжения, снимаемого с резистора R26. Это приводит к закрытию VT3 и последовательному открытию VT4, закрытию VT5 и открытию выходного триода VT6, в цепи коллектора которого установлен исполнительный орган К2 - промежуточное реле типа РП-220.

Конденсатор С17 обеспечивает повышение помехоустойчивости реле.

Блок питания реле состоит из стабилитрона V1, диодов VD5, VD6, резисторов R23-R25 и конденсаторов С9-С11. Он обеспечивает питание цепей стабилизированным напряжением оперативного тока: U_{6-7} =12 $\pm$ 1,2 В; $U_{7-8} \leq$ 2 В.

В ЗЗГ-1 предусмотрена раздельная сигнализация срабатывания исполнительных реле К1 и К2, контакты которых используются в схеме световой сигнализации на тиратронах VL1 и VL2. При срабатывании К1 загорается тиратрон VL1 “$К^{(1)}$, удаленное от нейтрали”, при срабатывании К2 загорается тиратрон VL2 “$К^{(1)}$ вблизи нейтрали”.

Проверка электрических характеристик. При внешнем и внутреннем осмотре помимо выполнения общих указаний по разд. 1 следует проверить крепление токоподводящих колодок: гнездовых - к корпусу реле и ножевых XT, X1 и X2 - к модулям реле.

При установке модулей на место они должны четко фиксироваться в рабочем положении с последующим креплением их к корпусу установочными винтами. В комплекте запасных частей к реле имеется шнур гибкой связи, обеспечивающий проверку модулей вне корпуса; перед использованием шнура его следует проверить на соответствие цепей гнездового входа ножевому выходу. При подключении внешних связей к зажимам реле, находящимся на его задней стороне, необходимо обращать внимание на расположение и цифровое обозначение зажимов (см. рис. 12.4).

При проверке изоляции цепей реле мегомметром следует предварительно отсоединить землю в цепях разделительных конденсаторов С9, С12 (см. рис. 12.5) оперативного тока (снять перемычку между зажимами XT : 7, XT : 9); объединить выходные зажимы реле по цепям напряжения XT : 8, XT : 11, XT : 13; объединить вторичные обмотки Т1, Т2, Т3 с цепями оперативного тока, для этого необходимо закоротить между собой все накладки на лицевых панелях обоих модулей и соединить их с выводами реле XT : 1 (+); XT : 5 (-). Проверяют сопротивление изоляции между объединенными цепями напряжения - цепями оперативного тока и сопротивление изоляции каждой цепи относительно земли при модулях, установленных и зафиксированных в рабочем положении.

При проверке блока питания оперативных цепей следует проверить напряжение стабилизации стабилитроном V1 и напряжение смещения на диодах VD5, VD6. При изменении напряжения питания от номинального до напряжения в пределах $\pm 10 \div 20\%$ должно быть U_{6-7} = 12 $\pm$ 1,2 В; $U_{7-8} \leq$ 2 В. Проверку и регулировку исполнительных органов К1 и К2

Файл скачан с www.turbinist.ru

проводят при вынутых из корпуса и полностью отключенных модулях. Ток при проверках подают на зажимы 6-4 для реле К1 и 6-21 для реле К2 при снятых накладках 4-5 и 21-22, расположенных на лицевых панелях; ток срабатывания устанавливают равным 16,8 ± 0,8 мА.

При подключении модулей (шнуром гибкой связи) проверяют работу тиратронов сигнализации и действие кнопки “Сброс сигнала”.

При настройке уставки срабатывания реле напряжения первой гармоники при поданном оперативном токе напряжение частотой 50 Гц от регулировочного устройства TUV подают на зажимы реле XT : 8 - XT : 11 (рис. 12.7). При проверке идущие ко вторичным обмоткам трансформаторов напряжения TV1, TV2 провода необходимо отсоединить, чтобы не появилось высокое напряжение на шинах генератора за счет обратной трансформации трансформаторами напряжения. Фиксацию срабатывания ведут по индикаторной лампе, подключенной на выводы К1 XT : 10 и XT : 12, или при медленном повышении напряжения по тиратрону. Напряжение $U_{ср}$ регулируют ступенчато резисторами R4-R7 и плавно R2. Коэффициент возврата $k_в \geq 0,8$.

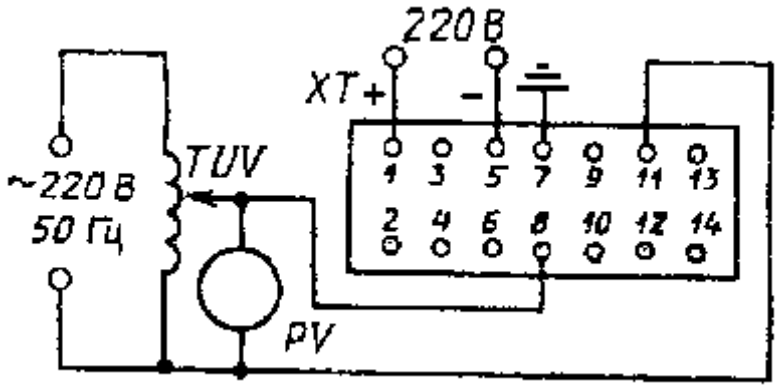


Рис. 12.7. Схема настройки реле максимального тока первой гармоники блок-реле ЗЗГ-1

При значительном отличии $U_{ср}$ от уставки иногда требуется произвести настройку входного фильтра R1, C1, T1, C2 (см. рис. 12.5) на частоту 50 Гц. При неизменном по величине и частоте напряжении на входе XT : 8 - XT : 11 перемещением магнитного шунта изменяют индуктивность T1. Вольтметром, включенным на вторичную обмотку T1, фиксируют максимум напряжения на зажимах 3-2 при введенной накладке 1-2 и надежно закрепляют в этом положении шунт.

Если требуется проверить работу усилителя, то при отсутствии входного сигнала, когда VT1 открыт, $U_{эк} < 0,3$ В (напряжение эмиттер - коллектор); когда VT2 закрыт, $U_{эк} > 10,5$ В, $U_{бэ} > 0,15$ В (напряжение база - эмиттер); при измерениях (+) прибора подключают к выводу триода, указанному первым. При срабатывании реле когда VT1 закрыт, $U_{эк} > 10,5$ В; когда VT2 открыт, $U_{эк} < 0,15$ В.

Проверку реле напряжения третьей гармоники с торможением (реле НТГ) выполняют в два этапа:

лабораторная проверка работоспособности реле;

настройка рабочей уставки на работающем генераторе.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Цель лабораторной проверки - выявить возможные повреждения устройства и получить данные, необходимые при настройке уставки.

Проверку настройки на резонансную частоту 150 Гц рабочей С13-Т2 и тормозной С14-Т3 цепей реле проводят раздельно при отключенном оперативном токе. Напряжение питания 1-5 В от звукового генератора подают соответственно на входные зажимы реле: рабочей цепи - ХТ : 11 - ХТ : 13, тормозной - ХТ : 13 - ХТ : 8. Для исключения взаимного влияния цепей при проверке рабочей цепи размыкают накладку 12-13, при проверке тормозной цепи - накладку 9-10. Поддерживая неизменной величину напряжения на входе, генератором изменяют частоту питания в пределах 150 ± 50 Гц. По максимальному значению показания вольтметра, включенного на вторичную обмотку трансформатора Т2 или Т3, измеряют напряжение U_{9-11} или U_{12-14} и фиксируют резонансную частоту, которая должна быть 150 ± 6 Гц. При проверке необходимо использовать вольтметр с высоким входным сопротивлением, проверяемые трансформаторы Т2 и Т3 должны находиться в режиме нагрузки, для чего необходимо установить перемычки 9-10 или 12-13. Дополнительно при данной проверке следует измерить напряжение U_{15-16} и U_{16-17} на выходе выпрямительных мостов VD2 и VD3, максимальное напряжение на них соответствует той же резонансной частоте. При необходимости подстройка на резонансную частоту осуществляется изменением индуктивности Т2, Т3 при перемещении их магнитного шунта.

Проверку минимального напряжения срабатывания при отсутствии торможения проводят при поданном оперативном токе и напряжении питания частотой 150 Гц.

Напряжение срабатывания реле НТГ, измеренное на входных зажимах ХТ : 11 - ХТ : 13, должно быть не более 0,3 В при разомкнутой накладке 12-13 и полностью введенном резисторе R26. Чтобы ввести данный резистор, его ось следует повернуть до упора по часовой стрелке, в этом случае $U_{15-16} = U_{18-16}$.

Следует измерить также напряжение срабатывания в этом режиме при частоте 50 Гц и по полученным результатам определить коэффициент ослабления фильтром напряжения промышленной частоты.

$$k_{ф} = U_{ср\ 50\ Гц} / U_{ср\ 150\ Гц},$$

$k_{ф}$ должен быть не ниже 25, обычно он ранен 25-30.

Проверку срабатывания реле при коэффициенте торможения $k_т = 1$ проводят при частоте напряжения питания 150 Гц по схеме, приведенной на рис. 12.8.

Файл скачан с www.turbinist.ru

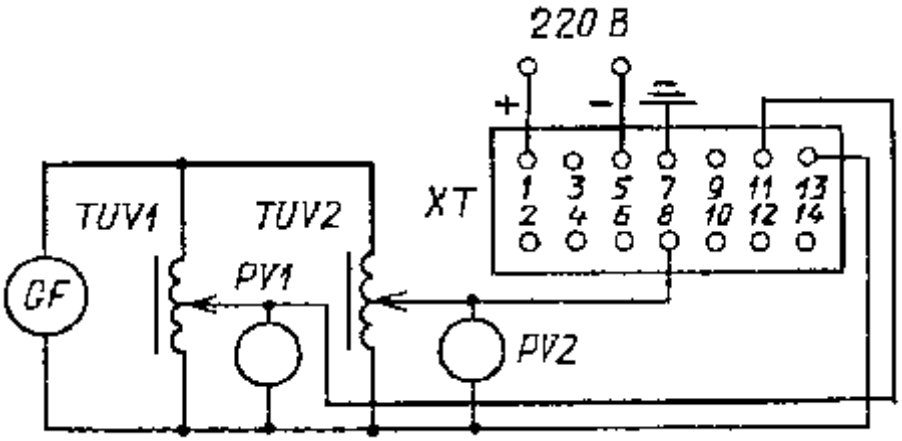


Рис. 12.8. Схема настройки реле третьей гармоники блок-реле ЗЗГ-1

Под коэффициентом торможения в соответствии с заводской документацией понимается отношение рабочего напряжения к тормозному, которые измерены в момент срабатывания:

$$k_т = U_{XT:11-XT:13} / U_{XT:8-XT:13}.$$

Приступая к проверке, предварительно следует полностью ввести резисторы R26 и R27 (ось резистора R27 необходимо повернуть до упора против часовой стрелки), в этом случае соблюдается условие $U_{18-16} = U_{15-16}$ и $U_{20-16} = U_{17-16}$. Регулировочным трансформатором TUV1 устанавливают любое фиксированное значение рабочего напряжения $U_{XT:13-XT:11}$ в пределах от 1 до 10 В и проверяют, чтобы реле К2 сработало. Затем повышают тормозное напряжение регулировочным трансформатором TUV2 до значения большего, чем установленное рабочее, и фиксируют возврат реле К2. Плавно уменьшают тормозное напряжение при неизменном рабочем и определяют значение тормозного напряжения $U_{XT:8-XT:13}$ в момент срабатывания.

При $k_т = 1$ измеренное тормозное напряжение не должно отличаться от установленного рабочего более чем на 15 %. Объем лабораторной проверки на этом заканчивается, реле подготовлено к проверке под нагрузкой. Иногда в проектных уставках, подтвержденных службой РЗА, задают требуемый $k_т$ - настройку его производят по приведенной выше методике изменением сопротивлений резисторов R26 и R27.

Приступая к проверке реле ЗЗГ-1 рабочим напряжением, необходимо проверить выполнение цепей напряжения TV, установленных на выводах и в нуле генератора, проконтролировать, чтобы единственное заземление во вторичных цепях TV было установлено в одной точке на зажиме реле XT : 8. Из-за невозможности точного расчета относительного емкостного сопротивления сети генераторного напряжения Z^*_∞ оно определяется при наладке для случая отсутствия замыкания на землю в этих цепях и при эксплуатационном уровне сопротивления изоляции. По рекомендациям ВНИИЭ для этого при пусковых испытаниях турбогенератора с подключенными блочным трансформатором и трансформатором собственных нужд на холостом ходу при номинальном напряжении и установленных накладках 9-10 и 12-13 измеряют напряжение U_{9-11} и U_{12-14}:

$$\overline{Z}^*_\infty = U_{12-14} / U_{9-11}.$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

Основным параметром, определяющим выбор срабатывания $\overline{Z}^{*}_{cp}$, является коэффициент надежности $k_н$, диапазон изменения которого от $k_{нmin}$ до $k_{нmax}$ рассчитывается по приведенному выражению

$$k_{нmin} = \sqrt{\frac{1 + 4Z^{*}_{\infty}\dfrac{U^{2}_{cp1}}{k^{2}_{ф}U^{2}_{9-11}}}{1 + \dfrac{U^{2}_{cp1}}{k^{2}_{ф}U^{2}_{9-11}}}} \le k_н \le$$

$$\le \frac{Z^{*}_{\infty}\dfrac{1 - 4U_{cp1}}{100}}{\dfrac{4U_{cp1}}{100}} = k_{нmax},$$

где U_{cp1} - уставка срабатывания реле первой гармоники, В; $k_{ф}$ - измеренный коэффициент ослабления фильтром напряжения промышленной частоты (если измерение не производилось, $k_{ф}$ принимается 25-30).

По рекомендации ВНИИЭ принимаемый коэффициент надежности должен быть $k_н \ge 3$, с уставкой срабатывания он связан следующим выражением:

$$k_н = Z^{*}_{\infty}/Z^{*}_{cp},$$

где $Z^{*}_{cp} = \dfrac{U_{12-14}}{U_{9-11}}$ в момент срабатывания.

Рассчитывая по формуле $k_{нmin}$ и $k_{нmax}$, определяют Z^{*}_{cpmin} и Z^{*}_{cpmax}; при выборе уставки должно выполняться условие

$$Z^{*}_{cpmin} \le Z^{*}_{cp} < Z^{*}_{cpmax}.$$

Как правило, устанавливают Z^{*}_{cp}, близкое к Z^{*}_{cpmin}. Реле НТГ в зависимости от Z^{*}_{cp} имеет различные зоны защиты обмотки статора:

при $Z^{*}_{cp} > 1$ реле НТГ имеет две зоны:

от нейтрали к выводам с защитой части обмотки генератора, определяемой по формуле, в процентах всей обмотки, принимаемой за 100%:

Файл скачан с www.turbinist.ru

$$\alpha = \frac{1}{2 + 1 / Z^*_{ср}} 100;$$

от выводов к нейтрали с защитой части обмотки генератора, определяемой по формуле, в процентах всей обмотки и вся сеть генераторного напряжения

$$\alpha = \frac{1}{2 - 1 / Z^*_{ср}} 100;$$

при $Z^*_{ср}$ <1 реле НТГ имеет одну зону работы генератора, которая определяется по формуле в процентах обмотки

$$\alpha = \frac{1}{2 + 1 / Z^*_{ср}} 100.$$

При непосредственной настройке уставки $Z^*_{ср}$ уровень регулирования напряжения рабочей цепи резистором R26 и напряжения тормозной цепи резистором R27 определяется рабочим и тормозным коэффициентами регулирования (соответственно $К_{р.р}$, $К_{р.т}$):

$$К_{р.р} = \frac{U_{18-16}}{U_{15-16}}; \qquad К_{р.т} = \frac{U_{20-16}}{U_{17-16}}.$$

Из этих выражений с определенными допущениями можно получить

$$N = \frac{K_{р.т}}{K_{р.р}} = \frac{U_{20-16} U_{15-16}}{U_{17-16} U_{18-16}} = \frac{k_н}{Z^*_\infty} = \frac{1}{Z^*_{ср}}.$$

При принятом $Z^*_{ср}$ вычисляют отношение

$$N = \frac{K_{р.т}}{K_{р.р}} = \frac{1}{Z^*_{ср}}.$$

Если $N \le 1$, то резистором R26 устанавливают $К_{р.р} = 1$, т. е. $U_{18-16} = U_{15-16}$, резистором R27 устанавливают $U_{17-16} = Z^*_{ср} = U_{20-16}$, так как $К_{р.т} = 1/Z^*_{ср} = U_{20-16} / U_{17-16}$. Если же N >

Файл скачан с www.turbinist.ru

1, то резистором R27 устанавливают $K_{p.p} = 1$, т. е. $U_{20–16} = U_{17–16}$, а резистором R26 - устанавливают $U_{18–16} = Z^*_{cp} / U_{15–16}$.

Проверяют соответствие полученного значения $k_н$ настроенной уставке Z^*_{cp}:

$$k_н = \frac{Z^*_\infty}{Z^*_{cp}} = \frac{U_{12–14}}{U_{9–11}} \cdot \frac{U_{15–16}}{U_{18–16}} \cdot \frac{U_{20–16}}{U_{17–16}} \geq 3.$$

После завершения регулирования уставки рекомендуется от проверочного устройства при частоте 50 Гц провести изменение напряжения срабатывания реле НТГ в двух режимах:

при подаче напряжения $U_{XT:11–XT:13}$ и разомкнутой накладке 12-13;

при подаче напряжения $U_{XT:11–XT:13}$ и замкнутой накладке 12-13, когда из-за параллельной цепи С14-Т3; С1, Т1-R1 присутствует эффект торможения.

Полученные при этой проверке результаты позволяют в период эксплуатации быстро и объективно проверить исправность реле. При проверке необходимо соблюдать технику безопасности, чтобы исключить подачу напряжения от проверочного устройства на вторичные обмотки трансформаторов напряжения.

12.3. Блок-реле типа КРС-2

Защиту от внешних симметричных КЗ и защиту от потери возбуждения турбогенераторов выполняют с использованием двух дистанционных реле К1 и К2 комплекта КРС-2.

Блок-реле типа КРС-2 предназначен для использования в различных схемах релейной защиты в качестве пускового или дистанционного органа, который реагирует на отклонение значения полного сопротивления от установленного. Комплект содержит три реле сопротивления К1, К2, К3, которые включены на линейные напряжения и разность фазных токов (рис. 12.9); предусмотрена возможность с помощью перемычек на зажимах производить переключение реле комплекта на фазное напряжение и фазный ток с компенсацией по $3 I_0$.

Файл скачан с www.turbinist.ru

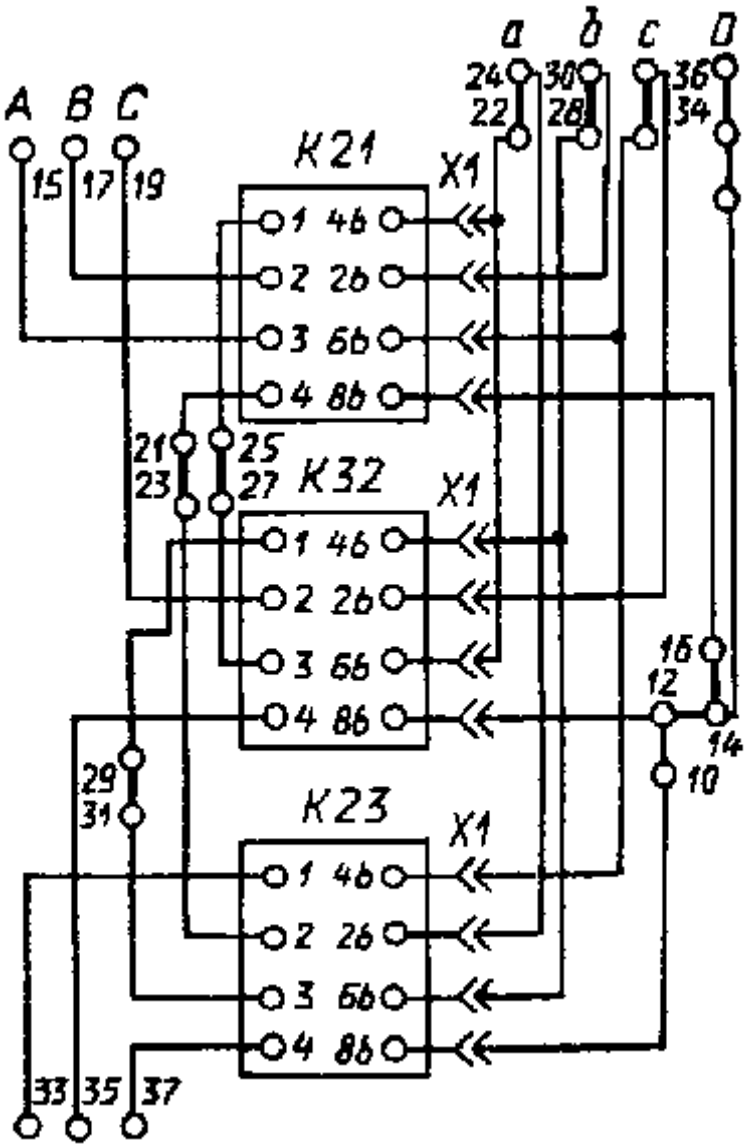


Рис. 12.9. Схема включения комплекта КРС-2 во вторичные цепи трансформаторов тока и напряжения

В качестве реагирующих органов схем сравнения применены магнитоэлектрические реле или полупроводниковые нуль-индикаторы, аналогичные рассмотренным в разд. 8. Исполнительными органами нуль-индикаторов являются выходные промежуточные реле К1-К3, выполненные на базе реле серии РП-220. Схемой комплекта (рис. 12.10) предусмотрена работа всех реле сопротивления на одно выходное реле К2 - в этом случае устанавливают перемычки 1-3, 5-7, 7-9, 11-13 - или индивидуальная работа каждого реле сопротивления на свое промежуточное реле - в этом случае устанавливают перемычки 3-5, 9-11, 18-20 и снимают 1-3, 5-7, 7-9, 11-13. Диоды VD4, VD5, VD7 обеспечивают стабилизацию режима работы выходных транзисторов VT нуль-индикаторов. Стабилитроны V1, V2, V3 и резистор R28 служат для создания необходимого времени возврата исполнительных реле.

Файл скачан с www.turbinist.ru

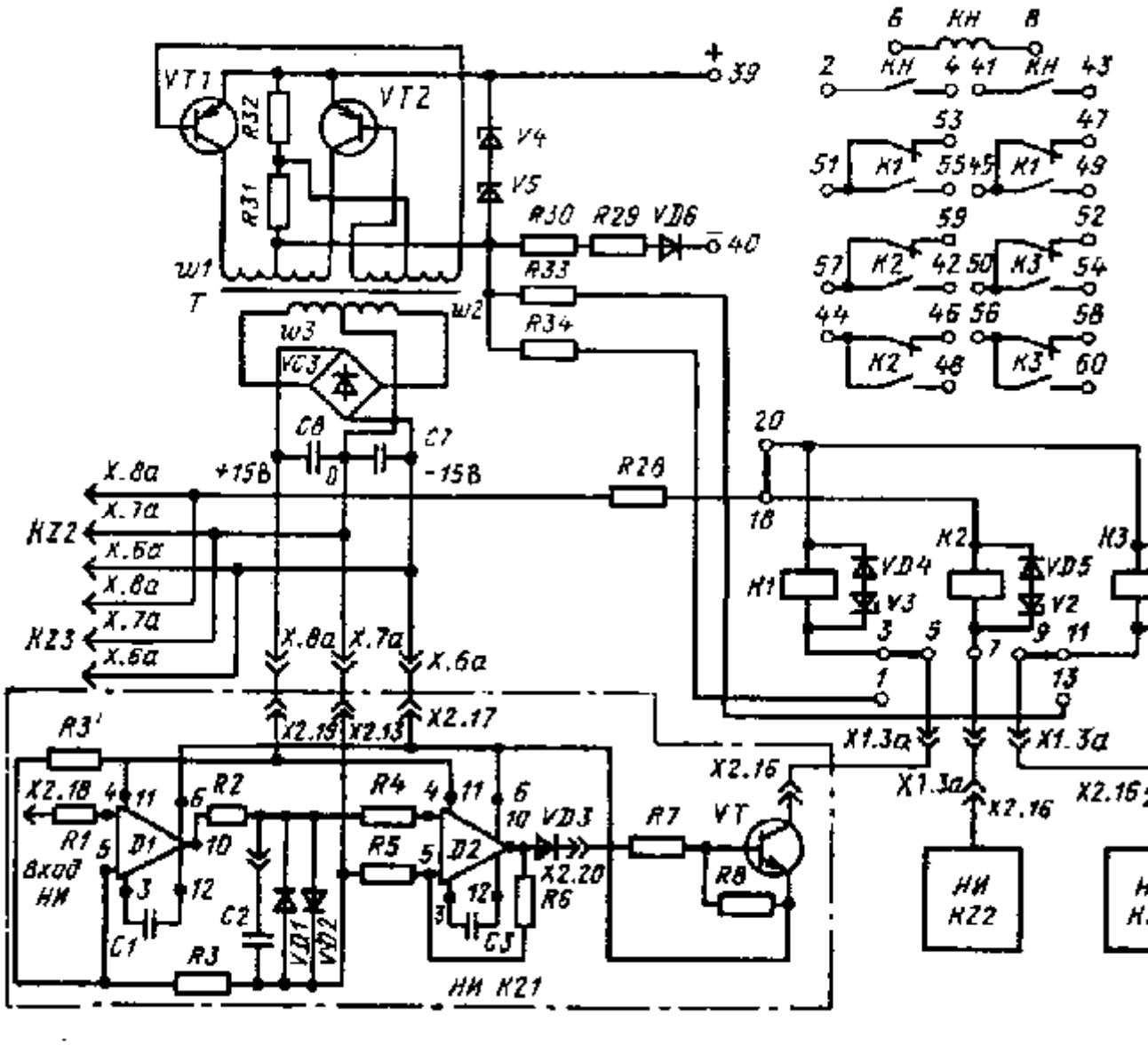


Рис. 12.10. Оперативные цепи комплекта КРС-2

Блок питания нуль-индикаторов, установленный в комплекте, практически не отличается от применяемых в комплектах ДЗ-2, за исключением места установки дополнительных резисторов R30, R29, смонтированных здесь внутри комплекта.

Принцип действия дистанционных органов комплекта КРС-2 аналогичен принципу действия рассмотренных в разд. 8 дистанционных органов комплекта КРС-1 с дополнительным контуром подпитки, как у реле KZ комплектов ДЗ-2 (рис. 12.11).

Файл скачан с www.turbinist.ru

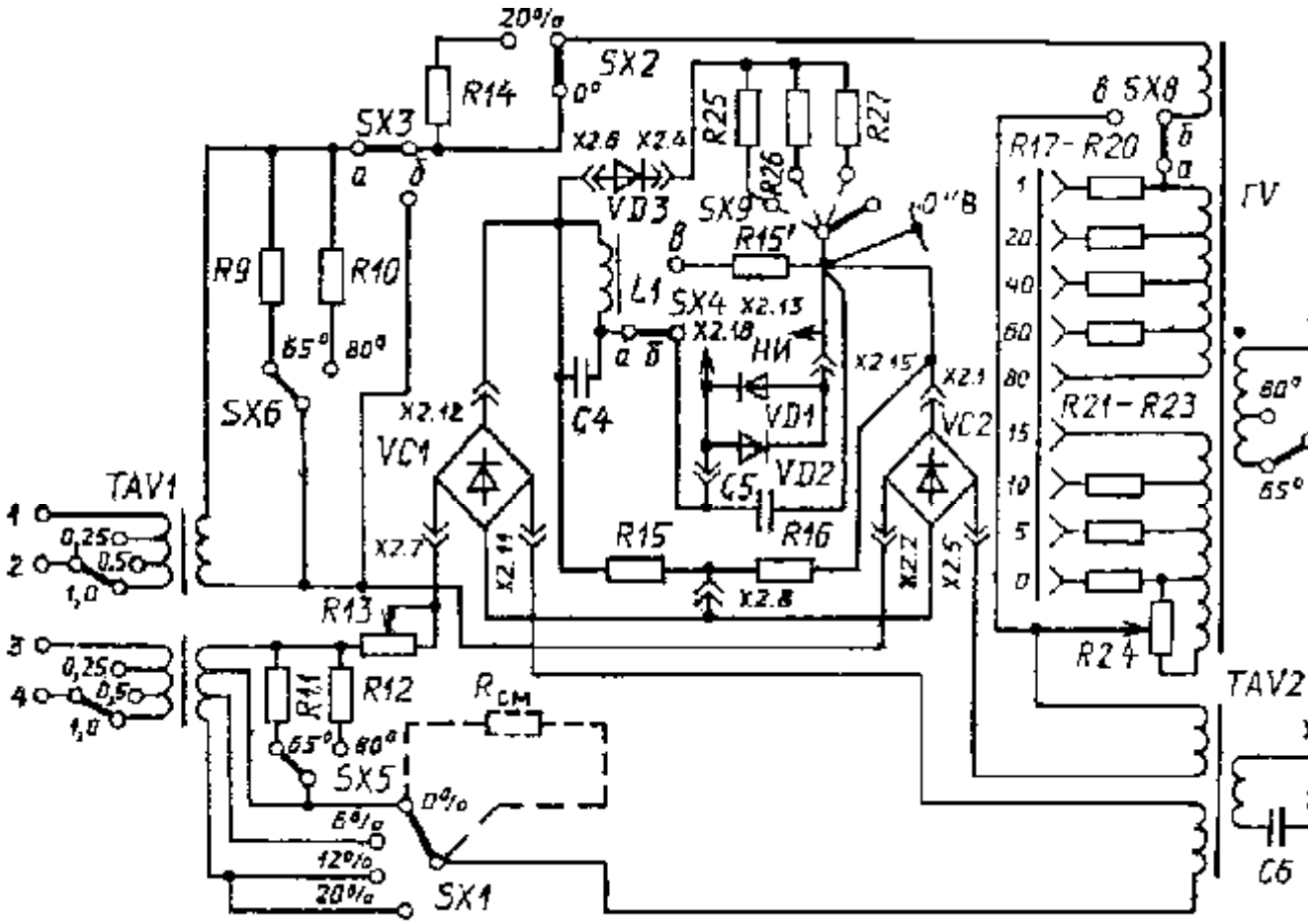


Рис. 12.11. Схема реле сопротивления комплекта КРС-2

Такое выполнение обеспечивает работу дистанционных органов при близких КЗ в режиме реле направления мощности, для расширения возможности применения и предотвращения излишних срабатываний от токов нагрузки предусмотрено получение эллиптической характеристики и смещение характеристик в III квадрант. Смещение достигается введением в рабочий контур схемы сравнения дополнительной ЭДС, пропорциональной току. Ступенчатую регулировку смещения 0-6-12-20% $Z_{уст}$ для круговой характеристики и 0-5,5-11-18 % $Z_{уст}$ для эллиптической характеристики производят изменением числа витков вторичной обмотки TAV1 рабочего контура переключателем SX1. Для случая наибольшей уставки смещения 20 (18)% дополнительно в тормозной контур следует вводить резистор R14 накладкой SX2.

Обозначения основных элементов реле сопротивлений комплектов КРС-2 и КРС-1, за исключением номеров накладок, совпадают. В связи с тем что в защите блока используются только два реле комплекта, работающие без подпитки от третьей фазы, в токовых цепях комплекта следует снять перемычки 21-23, 29-31 и установить их между выводами 21-29-35, эти переключения позволяют полностью отделить неиспользуемое реле KZ3 по токовым цепям (рис. 12.12). В цепях напряжения следует снять перемычки 22-24, 34-36, 10-12-14-16, а соединительные провода от цепей TV а, Ь, с подключить на выводы комплекта 22, 28-30, 36; выходные цепи реле следует разделить, KZ1 действует на К1, KZ2 - на К2.

Файл скачан с www.turbinist.ru

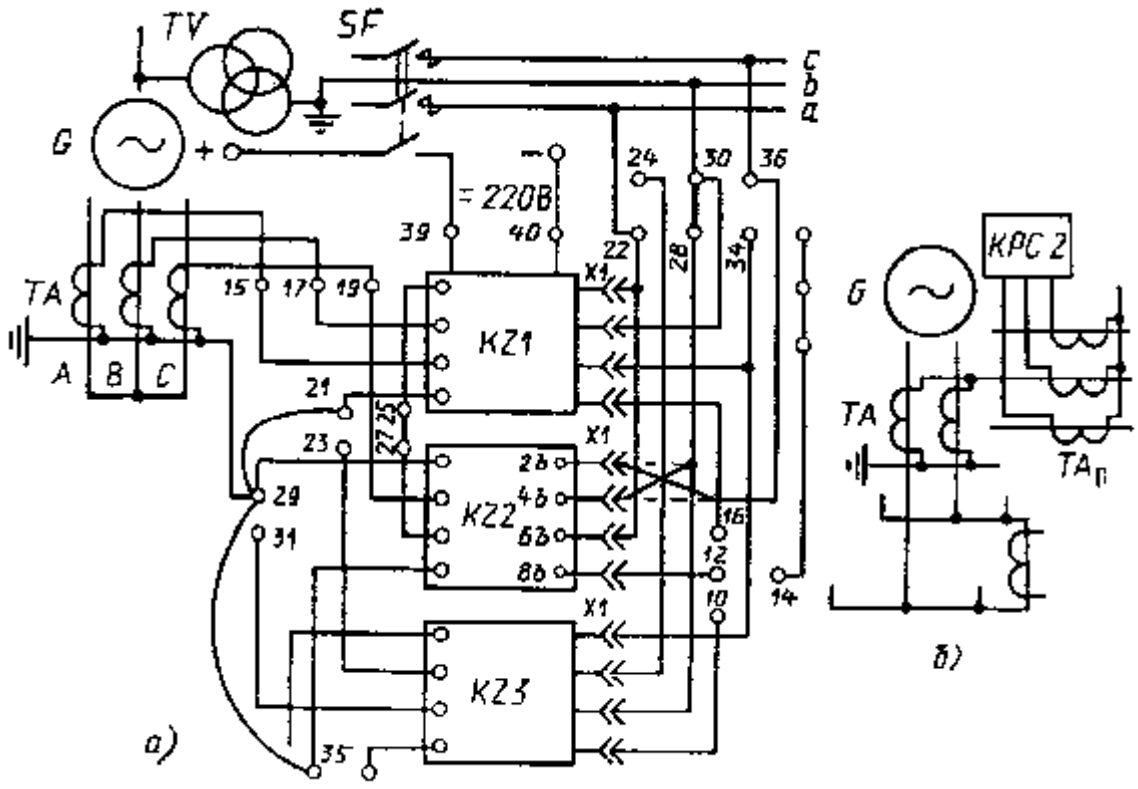


Рис. 12.12. Использование комплекта КРС-2 для выполнения защиты блока генератор - трансформатор:

а - подключение комплекта КРС-2 [жирными линиями показаны вновь устанавливаемые перемычки и вновь монтируемые цепи напряжения реле KZ2; пунктирными линиями показаны демонтируемые (заводские) провода]; б - включение комплекта КРС-2 в цепи дополнительных трансформаторов тока $TA_{п}$

Защита блока от внешних симметричных КЗ выполняется с использованием реле KZ1 (см. рис. 12.12).

Реле включается на разность токов $I_a - I_b$ трансформаторов тока, установленных в нейтрали обмотки статора, и на напряжение U_{ab} во вторичных цепях основных обмоток трансформаторов напряжения $U_{ном} = \frac{100}{\sqrt{3}}$ В, установленных на выводах генератора. Трансформаторы тока ТА соединяют в звезду, фазные провода к реле подводят от выводов ТА со стороны обмотки статора, нуль трансформаторов тока собирают на выводах в сторону нуля генератора. При наличии параллельных выводов обмотки статора, когда вторичные обмотки трансформаторов тока каждой фазы соединяются параллельно, ток на защиту подается через промежуточные трансформаторы тока $TA_{п}$ с коэффициентом трансформации 10/5 А.

Вторичная уставка срабатывания реле подсчитывается по формуле

$$Z_{ср} = Z_{ср.п} \frac{K_{TA}}{K_{TV}} K_{TA_п},$$

Файл скачан с www.turbinist.ru

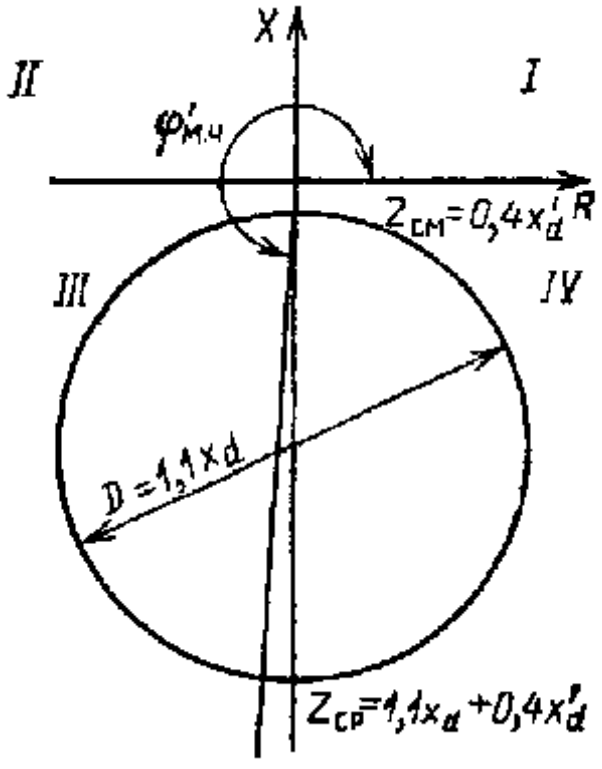
где $К_{TA}$ - коэффициент трансформации ТА; $К_{TV}$ - коэффициент трансформации TV; $К_{TA_п}$ - коэффициент трансформации промежуточных трансформаторов тока $ТА_п$, если они используются; $Z_{ср.п}$ - первичная уставка срабатывания, Ом/фазу.

Реле сопротивления KZ1 обычно используют с круговой или эллиптической характеристикой при смещении ее в III квадрант, что обеспечивает надежное срабатывание защиты при КЗ на выводах и позволяет не использовать подпитку от третьей фазы. Смещение характеристики в III квадрант по линии максимальной чувствительности целесообразно принимать для круговой характеристики 12 %, для эллиптической 11 %, угол максимальной чувствительности реле 80°.

Для исключения ложного срабатывания защиты обязательно выполняется ее блокирование при нарушении исправности цепей TV, с этой целью цепи питания постоянного тока подводятся на защиту через вспомогательные контакты автоматического выключателя SF, установленного во вторичных цепях TV. При отключении автоматического выключателя или нарушении цепи его вспомогательного контакта защита выводится из работы. Проверку электрических характеристик реле проводят в полном соответствии с рекомендациями разд. 8 с обязательным опробованием блокировки защиты при отключении автоматического выключателя SF в цепях напряжения.

Защита от потери возбуждения генератора реагирует на изменение сопротивления на его выводах и выполняется с помощью реле сопротивления, имеющего круговую характеристику.

В нормальном нагрузочном режиме вектор полного сопротивления на выводах обычно находится в I квадранте комплексной плоскости сопротивлений. При потере возбуждения генератор потребляет из сети значительную реактивную мощность и продолжает нести активную нагрузку, в связи с чем указанный вектор полного сопротивления перемещается в IV квадрант. Реле сопротивления KZ2 комплекта КРС-2, выполняющее функции защиты от потери возбуждения, должно иметь характеристику, расположенную в III и IV квадрантах (рис. 12.13).



Файл скачан с www.turbinist.ru

Рис. 12.13. Характеристика реле KZ2 защиты от потери возбуждения генератора

По результатам многочисленных испытаний и исследований принято, что характеристика реле должна соответствовать следующим требованиям:

круговая характеристика должна иметь смещение в III-IV квадранты, равное $Z_{см}$ =0,4 x'$_d$, этим обеспечивается срабатывание реле при асинхронном режиме работы генератора с полной нагрузкой и замкнутой накоротко обмоткой ротора:

диаметр окружности характеристики принимают равным 1,1 x_d для обеспечения надежной работы реле при потере возбуждения ненагруженного генератора;

угол максимальной чувствительности реле при этом желательно иметь равным 270°.

Чтобы реле KZ2 могло максимально соответствовать перечисленным выше требованиям, в заводскую схему исполнения данного реле вносят небольшие изменения. По заводской схеме реле KZ2 включено на разность токов I_b - I_c и напряжение U_{bc} (см. рис. 12.9) при $\varphi_{мч}$ = 80° имеет круговую характеристику, расположенную в I и II квадрантах. Для создания направленности реле в сторону генератора необходимо перепаять провода цепей напряжения b и c на разъеме X1 (см. рис. 12.12). Провод фазы b отпаивают от X1.4b, провод фазы c - от X1.2b и, поменяв провода местами, надежно припаивают их. Провод фазы c присоединяется к зажиму X1.4b - начало обмотки TV реле, а провод фазы b - к зажиму X1.2b, при этом угол максимальной чувствительности изменяется по сравнению с указанным в заводской документации на 180° при сохранении включения реле относительно входных зажимов комплекта КРС-2 на тот же ток I_b - I_c и то же напряжение U_{bc}. Чтобы по возможности приблизить $\varphi_{мч}$ к 270°, накладки SX5 и SX6 размыкают, накладку SX7 устанавливают в положение 80°, при таких переключениях угол максимальной чувствительности реле $\varphi_{мч}$ достигает 265-267°, но при этом может несколько больше допустимого отличаться от заводской минимальная уставка срабатывания реле.

Выполнение смещения характеристики в III-IV квадранты - зону, противоположную по сравнению с предусмотренной схемой реле, достигается разбалансировкой сопротивлений рабочего и тормозного контуров при включении в рабочий контур дополнительного резистора $R_{см}$ (рис. 12.11). Резистор МЛТ-2, сопротивление которого в пределах 1-2,5 кОм уточняется при наладке, включается под заводские винты в гнезда вместо накладки SX1 в положение 0%, накладка SX2 устанавливается в положение 0 %, точная регулировка $Z_{см}$ выполняется резистором R13. В справочниках и заводской документации на генераторы значения x_d и x'_d приводятся в относительных единицах, необходимые первичные уставки $Z_{см.п}$ и $Z_{ср.п}$ можно рассчитывать по формулам, Ом,

$$Z_{см.п} = \frac{0{,}4U^2_{ном}x'_d \cdot 100}{S_{ном}}; \qquad Z_{ср.п} = \frac{U^2_{ном} \cdot 100}{S_{ном}}(1{,}1x_d + 0{,}4x'_d),$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение генератора, В; $S_{ном}$ - номинальная мощность генератора, В·А; x_d, x'_d - реактивные сопротивления генератора в относительных единицах.

Пересчет полученных первичных значений во вторичные уставки срабатывания реле проводят в полном соответствии с расчетом уставки реле KZ1.

В связи с некоторым отличием реле KZ2 от заводской схемы при проверке электрических характеристик реле имеются отличия от заводских рекомендаций. Выравнивание

Файл скачан с www.turbinist.ru

сопротивлений рабочего и тормозного контуров следует производить по заводской методике резистором R13 при накладке SX1, установленной временно в положение 0 %, расчетных витках N на плате регулирования уставок и при полностью введенном резисторе плавной регулировки уставки R24.

Настройку рабочей уставки производят при угле настройки 270° по двум контрольным точкам $Z_{см}$ и $Z_{ср}$. Параметры срабатывания реле $Z_{см}$ и $Z_{ср}$, взаимно связаны, регулирование уставки изменением числа витков N и положением резистора R24 влияет и на значение $Z_{см}$, включение $R_{см}$ и изменение сопротивления R13 влияют на значение $Z_{ср}$, хотя взаимное влияние при регулировании на второй параметр сказывается в меньшей степени. Поэтому необходимые уставки срабатывания обычно удается получить с двух-трех попыток, меняя в первую очередь $R_{см}$ и R24, а затем R13 и число витков N; тем не менее расчетное число витков может существенно отличаться от выставленных при $Z_{ср}$. Снятие круговой характеристики и определение $\varphi_{мч}$ производят по обычной методике, только при каждом значении угла проверки фиксируют две точки срабатывания. Верхнюю уставку срабатывания определяют при уменьшении Z (уменьшают напряжение на проверочном устройстве У5053), нижнюю уставку - при увеличении Z от нуля, при проверке по измерителю угла сдвига фаз контролируют стабильность угла между током I_{bc} и напряжением U_{bc}, подведенным к реле.

На реле при проверке от У5053 можно подать напряжение не более 110 В, а так как $Z_{ср}$ бывает достаточно большим, проверку круговой характеристики и настройку $Z_{ср}$ обычно производят при заводском значении тока 10 %-ной точности или чуть большем.

После окончательной регулировки уставок и фиксации положения регулировочных резисторов R13, R24 определяют ток на входе нуль-индикатора (накладка SX4) при токе $I_{bc} = I_{н}$ и зашунтированных цепях напряжения в двух режимах: при установленном $R_{см}$ и при $R_{см}$, зашунтированном временной перемычкой.

Данные результаты могут потребоваться для периодического контроля в процессе эксплуатации. Проверку правильности включения дистанционных органов KZ1 и KZ2 выполняют при пусковых испытаниях энергоблока в опыте КЗ, когда генератор работает на трехфазную закоротку, установленную за блочным трансформатором. Если проверка обоих реле проводилась последовательно одним проверочным устройством, достаточно проверить реле KZ1, чтобы сделать вывод о правильном включении комплекта. Для реле KZ1 опыт КЗ генератора - самый наглядный режим, когда реле должно работать. При подготовке к проверке необходимо вывести оперативными накладками цепи отключения защит с использованием KZ1 и KZ2, подать на комплект оперативный ток для обеспечения возможной работы нуль-индикаторов и вывести смещение характеристики реле KZ1 в III квадрант.

В опыте КЗ генератора фиксируют срабатывание исполнительного органа реле К1, микроамперметром в рассечке а-б накладки SX4 измеряют ток, который должен иметь направление на срабатывание нуль-индикатора.

В опыте ХХ генератора при номинальном напряжении проверяют в рассечке SX4 максимальный тормозной ток, несрабатывание исполнительного реле К1. Проверки, проведенные при испытаниях генератора в указанном объеме, позволяют при работе его под нагрузкой свести последующие проверки к минимуму и ограничиться только снятием векторной диаграммы цепей тока относительно цепей напряжения а, Ь, с, подведенных к комплекту КРС-2.

12.4. Блок-реле типа РТФ-6М

Файл скачан с www.turbinist.ru

В настоящее время широко внедрены в эксплуатацию мощные турбогенераторы с непосредственным охлаждением обмоток. Эти генераторы характеризуются малой перегрузочной способностью, особенно при работе в несимметричных режимах. Допустимая длительность несимметричного режима определяется из выражения

$$t_{доп} = A/I_{*2}^2,$$

где I_{*2}^2 - кратность тока обратной последовательности по отношению к номинальному току генератора; А - постоянная величина для генераторов данного типа: для турбогенераторов ТВФ-15; ТГВ, ТВМ, ТВВ (кроме ТВВ-1000-4 и ТВВ-1200-2) - 8; ТВВ-1000-4 и ТВВ-1200-2-6. В условиях переходного процесса при несимметричных КЗ ток обратной последовательности может изменяться во времени. При этом допустимая длительность его теплового действия определяется среднеквадратичным значением за время $t_{доп}$:

$$t_{*2экв} = \sqrt{\frac{1}{t_{доп}} \int_0^{t_{доп}} I_{*2t}^2 dt}.$$

Поскольку перегрузка генератора в несимметричных режимах и при несимметричных КЗ зависит только от токораспределения обратной последовательности в системе, во избежание повреждения генератор должен быть отключен с выдержкой времени, не превышающей $t_{доп}$. Эту функцию и выполняет токовая защита обратной последовательности с зависимой интегральной характеристикой выдержки времени типа РТФ-6М.

Структурная схема блок-реле приведена на рис. 12.14. В состав комплекта РТФ-6М входят следующие элементы:

блок питания БП, служащий для питания основных органов блок-реле и их выходных реле стабилизированным напряжением постоянного тока;

фильтр тока обратной последовательности ФТОП, преобразующий несимметрию токов на входе блок-реле в переменное напряжение, пропорциональное симметричным составляющим обратной последовательности;

входное преобразующее устройство ВПУ, выпрямляющее напряжения на входах органов блок-реле пропорционально относительному току обратной последовательности;

сигнальный орган СО, сигнализирующий о достижении тока обратной последовательности определенного уровня;

пусковой орган ПО, определяющий минимальное значение тока обратной последовательности, начиная с которого осуществляется защита генератора от несимметричных перегрузок с действием на отключение;

два органа Отсечка I и Отсечка II, срабатывающие на отключение генератора с независимой выдержкой времени;

Файл скачан с www.turbinist.ru

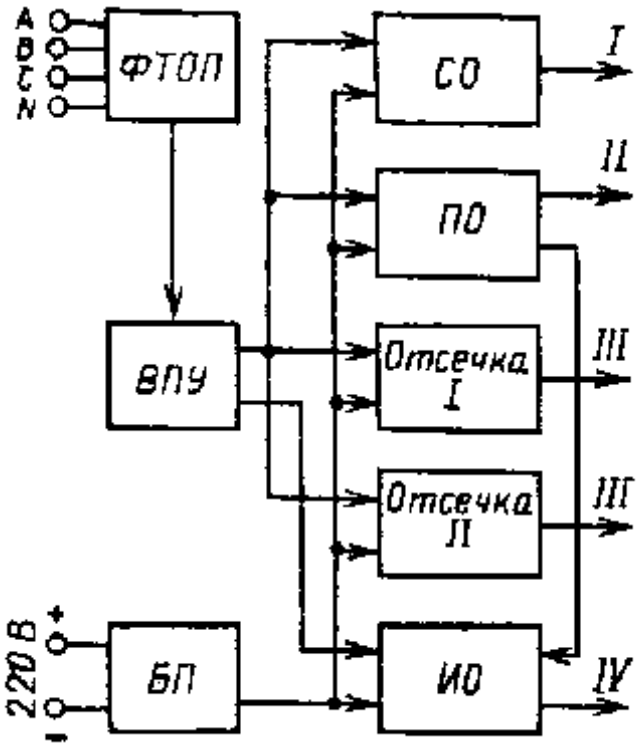


Рис. 12.14. Структурная схема блок-реле РТФ-6М:

I - сигнал о перегрузке; II - сигнал о пуске органа с зависимой выдержкой времени;
III - отключение генератора от органов с независимой выдержкой времени;
IV - отключение генератора с зависимой выдержкой времени

интегральный орган ИО, имеющий интегрально-зависимую характеристику выдержки времени, соответствующую допустимой длительности протекания токов обратной последовательности в генераторе.

Блок питания (рис. 12.15) состоит из резисторов R50-R55, стабилитронов VD13-VD15, фильтров для защиты от помех C14-C16 и диода VD16. Резистор R50 предназначен для регулирования напряжения питания органов без выдержки времени. Резисторы R11, R12 (на рисунке не показаны) образуют делитель напряжения, подключенный к минусу источника питания и к средней точке делителя опорного напряжения интегрального органа. Средняя точка делителя напряжения подключена к точке нулевого потенциала схемы через конденсатор C5. Эта цепь служит для компенсации погрешности при изменении напряжения питания в диапазоне от 0,8 $U_{ном}$ до 1,1 $U_{ном}$ во всем диапазоне рабочих температур. Для защиты контактов магнитоэлектрических реле от повышения напряжения используются стабилитроны VD1-VD3, включенные последовательно с резисторами R9, R10.

Файл скачан с www.turbinist.ru

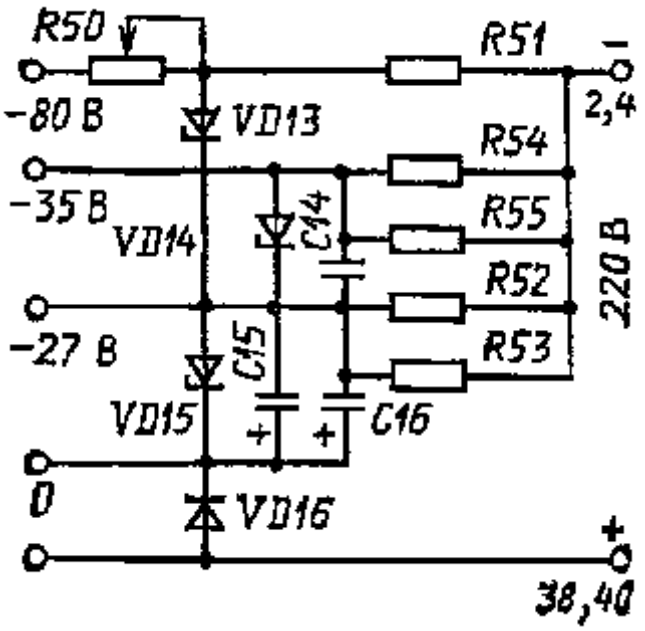


Рис. 12.15. Схема цепей блока питания РТФ-6М

Проверка питания заключается в настройке уровней напряжения в контрольных точках при поданном напряжении 220 В оперативного тока на зажимы 40-4. Напряжения, измеренные вольтметром постоянного тока с $R_{вн} \geq$ 20 кОм/В, должны соответствовать данным, приведенным ниже:

Место измерения *	40-I	28-III	28-VII	28-VIII	28-26	28-36
Напряжение, В	$75 \pm 0,5$	$21 \pm 0,5$	19,5-20	20,5-21	24-30	7-8,5
Орган регулирования	R50	R15	R23	R24	-	-

* Здесь и далее обозначения выводов, точек и разъемов реле указаны в соответствии с заводской документацией и не всегда приведены на рисунках.

Перед измерением напряжений необходимо зажим 40 соединить с точкой II (обмотка KL2).

Фильтр тока обратной последовательности ФТОП (рис. 12.16) состоит из трансформаторов TA1, TA3, трансреактора TAV2, резисторов R13, R14 и конденсаторов C8-C12. Трансформатор TA1 одной из первичных обмоток включается на ток фазы А, а другой обмоткой, имеющей в 3 раза меньшее количество витков, - в нулевой провод для компенсации влияния токов нулевой последовательности. Трансформатор TA3 и трансреактор TAV2 включены на разность токов фаз В и С. Вторичные обмотки TA3 и TAV2 включены встречно для того, чтобы совпали по фазе напряжение на емкостной нагрузке C11, C12 и ЭДС трансреактора. Каждая из этих составляющих равна половине падения напряжения в резисторах R13, R14, совпадающего по фазе с током фазы А. Применение в качестве реактивных элементов емкостей и индуктивности, сопротивления которых, приведенные к первичной стороне трансформаторов, при номинальной частоте примерно одинаковы, позволяет снизить небаланс и погрешности фильтра от изменения частоты в пределах $\pm$ 10% номинального значения. Настройка ФТОП па минимум небаланса производится переменным резистором R14, а компенсация угловой погрешности трансформатора TA1 и трансреактора TAV2 - емкостями C8-C10.

Файл скачан с www.turbinist.ru

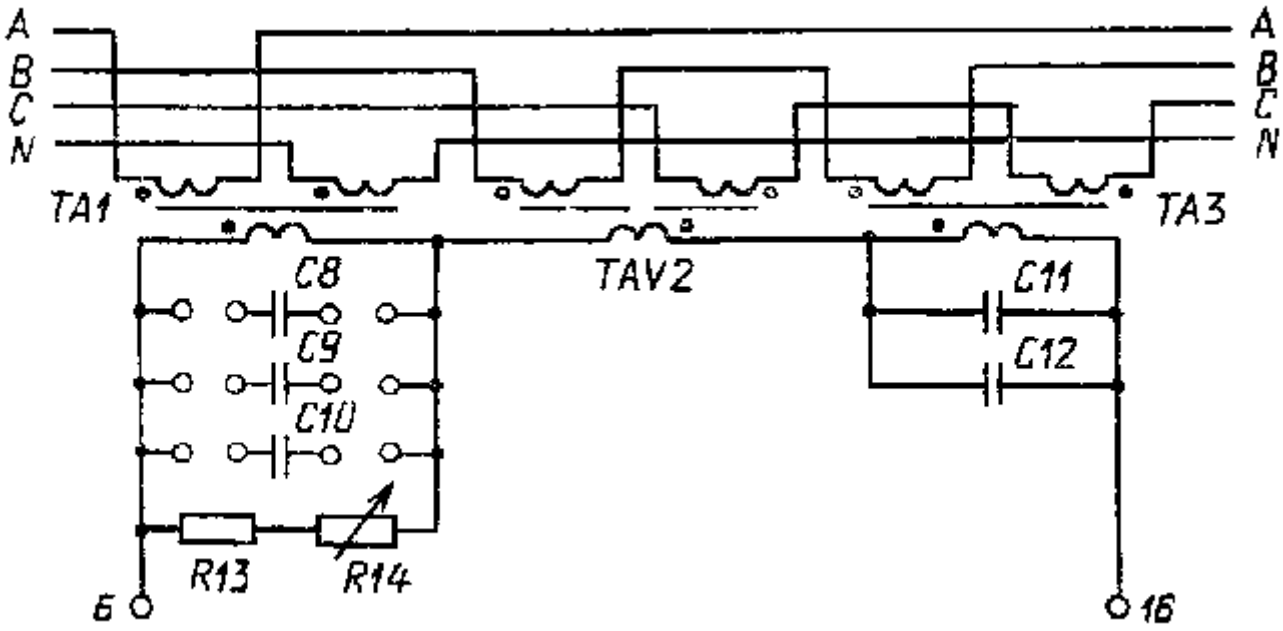


Рис. 12.16. Фильтр тока обратной последовательности РТФ-6М

При подаче на ФТОП тока прямой последовательности активная и реактивная составляющие равны и противоположны по фазе (рис. 12.17). При подаче на ФТОП тока обратной последовательности активная и реактивная составляющие равны и совпадают по фазе, на выходе фильтра появляется напряжение, пропорциональное току обратной последовательности.

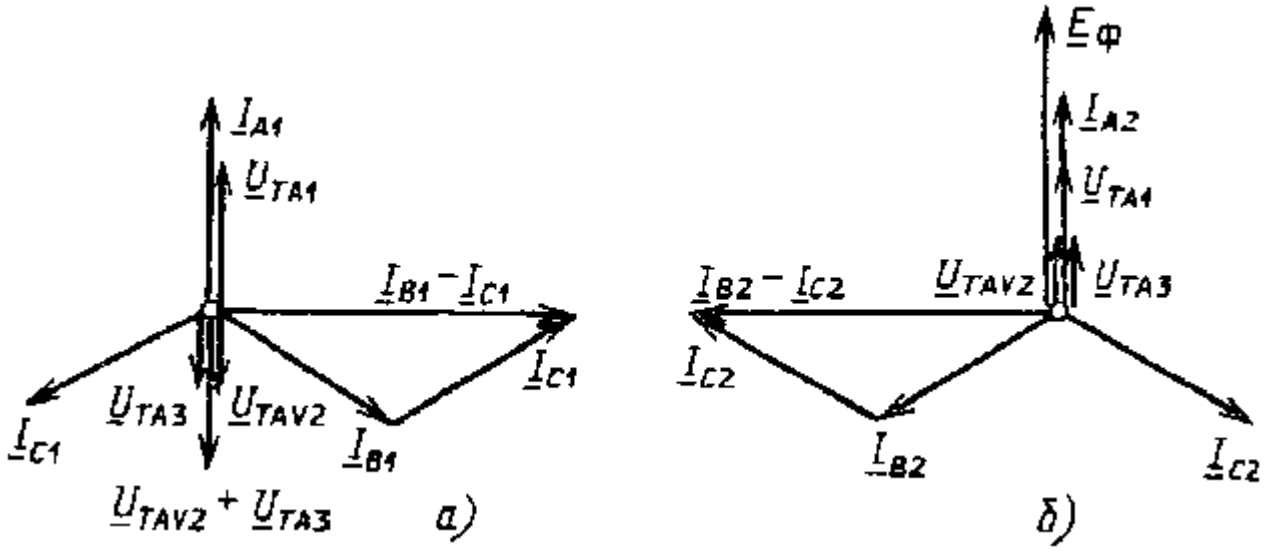


Рис. 12.17. Векторные диаграммы ФТОП:

а - при токе прямой последовательности;

Файл скачан с www.turbinist.ru

б - при токе обратной последовательности

Настройка ФТОП производится при имитации двухфазных КЗ. При снятых перемычках 6-8 и 14-16 на фазы АВ, ВС и СА поочередно подается ток $\sqrt{3}\,I_{ном}$. Разница между напряжениями, измеренными вольтметром с $R_{вн} \geq$ 20 кОм/В на зажимах 6-16, должна быть не более 1 В. Регулировка ФТОП производится резистором R14 и переключением конденсаторов С8-С10 на последовательное, параллельное или смешанное соединение.

Входное преобразовательное устройство ВПУ (рис. 12.18) состоит из регулируемых резисторов R15, R16, согласующего трансформатора TL4, выпрямительных мостов VC1, VC2, фильтра второй гармоники L1-C6, конденсатора С7, резисторов R17-R19 и стабилитрона VD4. На входах органов блок-реле напряжение определяется только кратностью тока обратной последовательности по отношению к номинальному току генератора и в определенных пределах не должно зависеть от значения номинального вторичного тока генератора. Для изменения входного напряжения органов блок-реле при настройке ФТОП предусмотрены резисторы R15, R16, регулирование которых позволяет устанавливать на входе напряжение, соответствующее номинальному току генератора при его значениях во вторичных цепях от 0,7 $I_{ном}$ до $I_{ном}$. Согласующий трансформатор TL4 отделяет цепи интегрального органа от остальных элементов защиты, имеющих связь по цепям питания. Вторичная обмотка ω_2 трансформатора имеет две отпайки для различных исполнений блок-реле по диапазонам регулировки уставок по постоянной А. На выходе вторичных обмоток включены выпрямительные мосты VC1 и VC2. Для сглаживания выпрямительного напряжения моста VC1 применен фильтр-шунт С6-L1, настроенный на частоту 100 (120) Гц. Нагрузкой моста является делитель входного напряжения органов без выдержки времени (R22, R23, R29, R30, R36, R42, R43). Сглаживание выпрямленного напряжения моста VC2 производится конденсатором С7, а нагрузкой являются резисторы R17 и R18 совместно с входным сопротивлением интегрального органа. Резистор R19 и стабилитрон VD4 вместе с входным сопротивлением интегрального органа представляет собой нелинейную цепь, необходимую для коррекции характеристики интегрального органа при токе $I_2 > 1{,}5\,I_{ном}$.

Настройка входного преобразовательного устройства сводится к выставлению напряжения на выходе моста VC1 (зажимы 20-22) в пределах $(60 \pm 0{,}5)$ В. Для этого необходимо предварительно разомкнуть перемычку 32-34 на входе интегрального органа, на зажимы 40-4 подать напряжение постоянного тока 220 В и на вход ФТОП (зажимы 1-3) подать ток, равный $\sqrt{3}\,I_{ном}$. Регулирование напряжения осуществляется резисторами R15, R16. Для измерения напряжения используется вольтметр постоянного тока с $R_{вн} \geq$ 20 кОм/Б (М1200, М1201, М2038 и др.).

Файл скачан с www.turbinist.ru

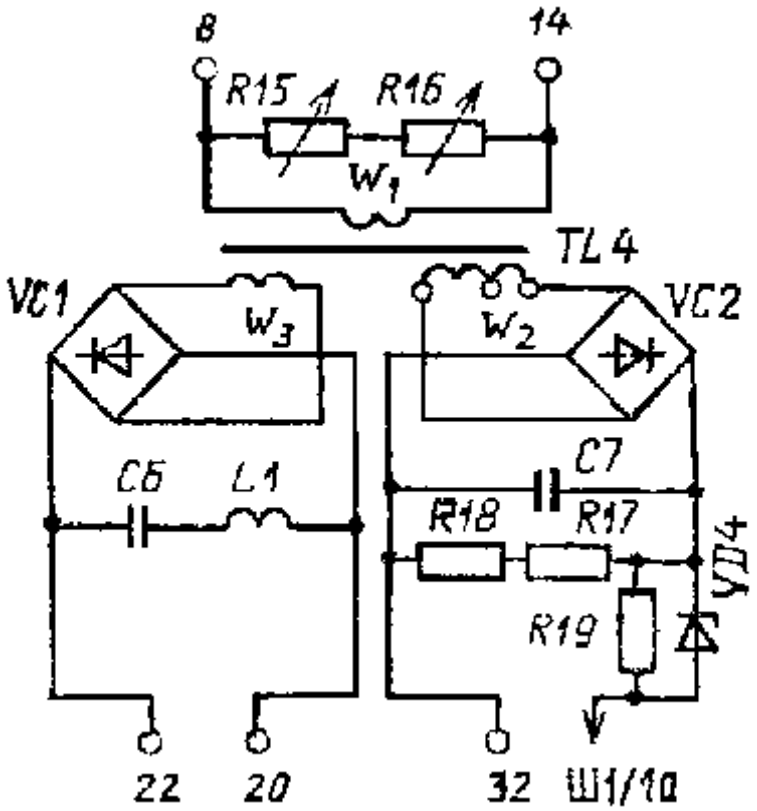


Рис. 12.18. Входное преобразовательное устройство РТФ-6М

Настройка фильтра-шунта С6-L1 на частоту 100 (120) Гц производится от генератора низкой частоты. Для этой цели на зажимы 18-22 через миллиамперметр переменного тока при разомкнутой перемычке 18-20 подводится напряжение частотой 100 (120) Гц. Изменением воздушного зазора дросселя L1 добиваются максимального показания миллиамперметра.

Органы с независимой выдержкой времени собраны по однотипным схемам, различающимся только параметрами некоторых резисторов. На рис. 12.19 приведена упрощенная схема сигнального органа, представляющая собой четырехплечий мост ACDE, к точкам A и D которого подводится напряжение от блока питания БП, а к точкам B и F - от делителя напряжения с выхода ВПУ (зажимы 20-22). В диагональ моста EC включено магнитоэлектрическое реле К1 типа М237/054, обмотка которого шунтирована демпфирующим резистором R24. Сопротивления плеч моста подобраны таким образом, чтобы при отсутствии напряжения на выходе ВПУ по обмотке реле проходил ток в тормозном направлении, значение которого регулируется в пределах 50-100 мкА резистором R26. Потенциалы точек B и F подобраны таким образом, что и при отсутствии напряжения от ВПУ или достаточно малом его значении диод VD5 заперт и ток, проходящий через него, пренебрежимо мал. При увеличении напряжения с выхода ВПУ диод VD5 начинает отпираться, а диод VD6 запираться. Ток в диагонали EC изменит направление и реле К1 сработает. Для изменения диапазонов уставок органов с независимой выдержкой времени без изменения параметров схем сравнения предусмотрена возможность ступенчатого изменения напряжения на делителе входного напряжения (R22, R23, R29, R30, R36, R42, R43). Плавное регулирование уставок осуществляется переменными резисторами R26, R33, R39 и R46. Для надежной работы контактов магнитоэлектрических реле К1-К4 параллельно им включены искрогасительные контуры R1-C1-R4-C4. Контакты магнитоэлектрических реле действуют на свои выходные реле KL1-KL4 типа РМУГ. Выдержки времени создаются с помощью дополнительных реле времени.

Файл скачан с www.turbinist.ru

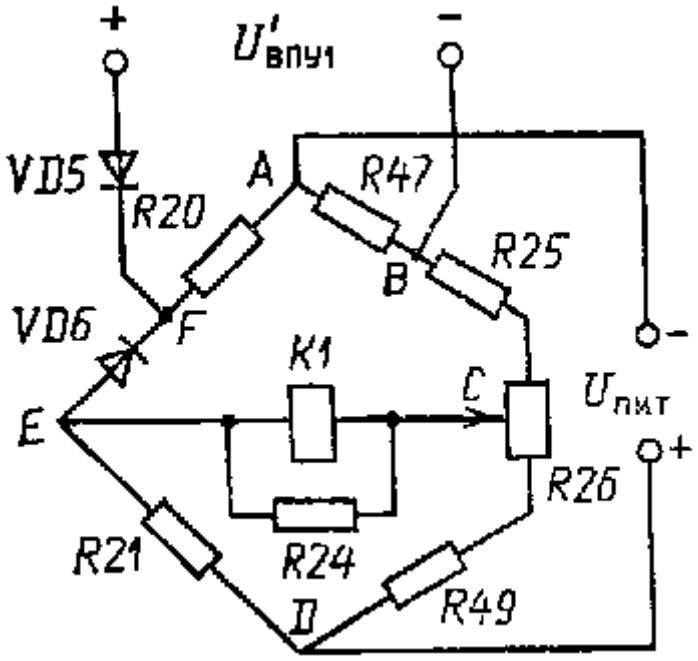


Рис. 12.19. Упрощенная схема сигнального органа

Настройка уставок производится при имитации КЗ на фазах АВ с пересчетом на ток обратной последовательности:

$$I_{*2} = \frac{I_2}{I_{ном}} = \frac{I_k^{(2)}}{\sqrt{3} I_{ном}}.$$

Срабатывание ступеней защиты фиксируется соответствующими выходными реле KL1-KL4. В точки а-б накладок XB1-XB4 включается микроамперметр (М1200, М1201 или др.) для измерения рабочего и тормозного токов магнитоэлектрических реле. Значения рабочего к тормозного токов должны находиться и пределах 50-100 мкА.

Интегральный орган (рис. 12.20) состоит из частотно-импульсного модулятора (ЧИМ), интегратора, блокинг-генератора, триггера и выходного реле. Для получения интегрально-зависимой характеристики времени в схеме интегрального органа используется заряд конденсатора током, среднее значение которого пропорционально квадрату относительного тока обратной последовательности. Время заряда конденсатора до определенного потенциала обратно пропорционально среднему значению зарядного тока, т. е. квадрату тока обратной последовательности. Подающийся на интегральный орган ток от ВПУ преобразуется в необходимый зарядный ток с использованием совмещенной частотно-импульсной и амплитудно-импульсной модуляции. В результате конденсатор заряжается импульсами тока неизменной продолжительности, амплитуда которых прямо пропорциональна, а длительность интервалов между импульсами обратно пропорциональна относительному току обратной последовательности. При исчезновении перегрузки по току обратной последовательности конденсатор переключается на разряд, имитирующий охлаждение генератора. Напряжение на конденсаторе уменьшается по экспоненте. Время полного охлаждения генератора соответствует времени снижения напряжения конденсатора от наибольшего значения до нуля после перегрузки, соответствующей порогу срабатывания интегрального органа, т. е. достижению максимально допустимого нагрева генератора. При повторной перегрузке генератора током обратной последовательности, возникшей до полного разряда конденсатора, интегральный орган сработает с меньшей выдержкой времени, чем после полного охлаждения.

Файл скачан с www.turbinist.ru

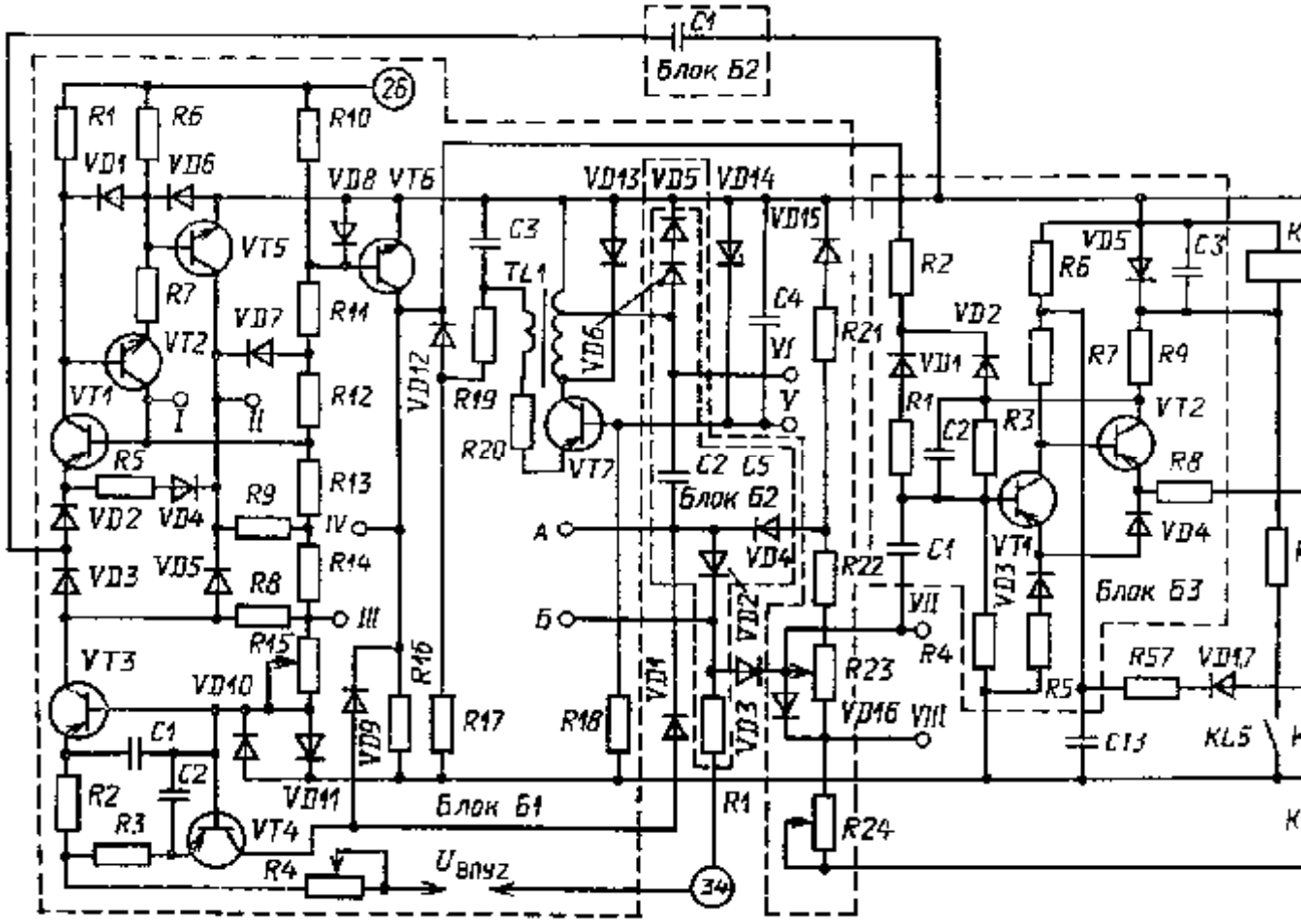


Рис. 12.20. Схема интегрального органа РТФ-6М

Частотно-импульсный модулятор преобразует входное выпрямленное напряжение в однополярные импульсы напряжения прямоугольной формы постоянных амплитуды и продолжительности, длительность пауз между которыми обратно пропорциональна входному напряжению. В нормальном режиме цепи питания интегрального органа разорваны замыкающим контактом пускового органа KL2. При достижении тока обратной последовательности, достаточного для срабатывания пускового органа, последний срабатывает и подает напряжение питания на ЧИМ, при этом диод VD11 закрывается. Напряжение, поступающее от ВПУ, откроет токостабилизирующий транзистор VT3 и по цепи диод VD10 - коллектор транзистора VT3 - диод VD3 начинается заряд конденсатора С1 блока Б2. Напряжение на емкости С1 при неизменном токе заряда увеличивается по линейному закону. В процессе заряда конденсатора С1 транзисторы VT1, VT2 и VT5 зашунтированы заряжающимся конденсатором, а транзистор VT6 насыщен за счет тока базы, протекающего по резисторам делителя напряжения R11-R15. Диоды VD2, VD4, DV5 и VD7 заперты, на выходе модулятора (коллектор VT6) - режим паузы.

При увеличении напряжения на конденсаторе С1 до значения, равного напряжению на базе транзистора VT1, через его базу начнет нарастать ток. Транзисторы VT1, VT2 и VT5 перейдут в режим насыщения, и конденсатор С1 блока Б2 начнет разряжаться через диод VD2 и далее по нескольким параллельным цепям: транзисторы VT1-VT2 - резистор R7 - переход база-эмиттер транзистора VT5; резистор 57 - диод VD4 - переход коллектор-эмиттер транзистора VT5; переход эммитер-база транзистора VT1 -эквивалентное сопротивление делителя опорного

Файл скачан с www.turbinist.ru

напряжения R12-R15 - диод VD7 - переход коллектор-эмиттер транзистора VT5. В течение всего времени разряда транзистор VT5 находится в режиме насыщения, диод VD3 заперт, а VD5 открыт. Ток коллектора VT3 отводится через насыщенный транзистор VT5 и диод VD5 к источнику питания, чем обеспечивается независимость разряда конденсатора от входного тока. Транзистор VT6 заперт током смещения через резистор R10, и на коллекторе VT6 формируется импульс, управляющий работой интегратора и блокинг-генератора. При разряде конденсатора C1 ток в диоде VD2 уменьшается, и когда разность между током разряда конденсатора C1 и током смещения через резистор R5 будет меньше тока, удерживающего транзисторы VT1 и VT2 в режиме насыщения, они благодаря сильной обратной положительной связи переходят в режим отсечки. Весь цикл повторяется.

Нелинейность преобразования тока обратной последовательности в ток заряда конденсатора C1, вызванная падением напряжения в диодах моста и зависимостью коэффициента передачи тока эмиттера от значения тока, компенсируется введением цепи подзаряда конденсатора C1 от точки III делителя опорного напряжения через резистор R8. Влияние тока подпитки велико при малых токах обратной последовательности. Ток разряда C1, а следовательно, и время разряда не изменяются. Поэтому ширина и амплитуда импульсов на выходе модулятора постоянны. Интервал между импульсами зависит от времени заряда C1, которое обратно пропорционально зарядному току C1 и току обратной последовательности. При возврате пускового органа конденсатор C1 разряжается через эквивалентное сопротивление всей схемы и размыкающие контакты реле KL2.

Интегратор представляет собой преобразователь входного напряжения от ЧИМ, пропорционального току обратной последовательности, в выдержку времени. Блок интегрирующих конденсаторов C2-C5 в блоке Б2 заряжается через токостабилизирующий транзистор VT4, управляемый напряжением от ВПУ аналогично транзистору VT3 и диодным ключом VD9 (блок Б1), VD1 (блок Б2). Диодный ключ, управляемый импульсами модулятора, преобразует ток коллектора транзистора VT4 в импульсы зарядного тока. Во время паузы транзистор VT6 насыщен, диод VD9 открыт и ток коллектора VT4 отводится через насыщенный транзистор VT6 к источнику питания. В то же время диод VD1 закрыт и блок конденсаторов C2-C5 отключен от зарядной цепи. Во время импульсов на выходе ЧИМ диод VD9 закрывается, а диод VD1 открывается и ток коллектора VT4 заряжает конденсаторы C2-C5. В процессе заряда напряжение конденсаторов повышается и когда оно превысит уровень напряжения на движке потенциометра R23, откроются диоды VD2, VD3 блока Б2 и коммутирующие импульсы, снимаемые с части обмотки блокинг-генератора, поступят на вход триггера и вызовут его срабатывание. Резистором R23, включенным в делитель опорного напряжения R21-R24, меняется время заряда блока конденсаторов C2-C5, что в свою очередь ведет к изменению уставки по постоянной А.

При возврате пускового органа KL2 конденсаторы C2-C5 переключаются на разряд по цепи диод VD2 - резистор R1 - размыкающие контакты реле KL2. Ток разряда изменяется по экспоненциальному закону и имитирует охлаждение ротора после устранения несимметричного режима. В нормальном режиме на конденсаторах C2-C5 имеется начальное напряжение 2-3 В, так как блок конденсаторов через диод VD4 подключен к резистору R21 делителя опорного напряжения.

На рис. 12.21 приведены графики, поясняющие работу частотно-импульсного модулятора и интегратора.

Файл скачан с www.turbinist.ru

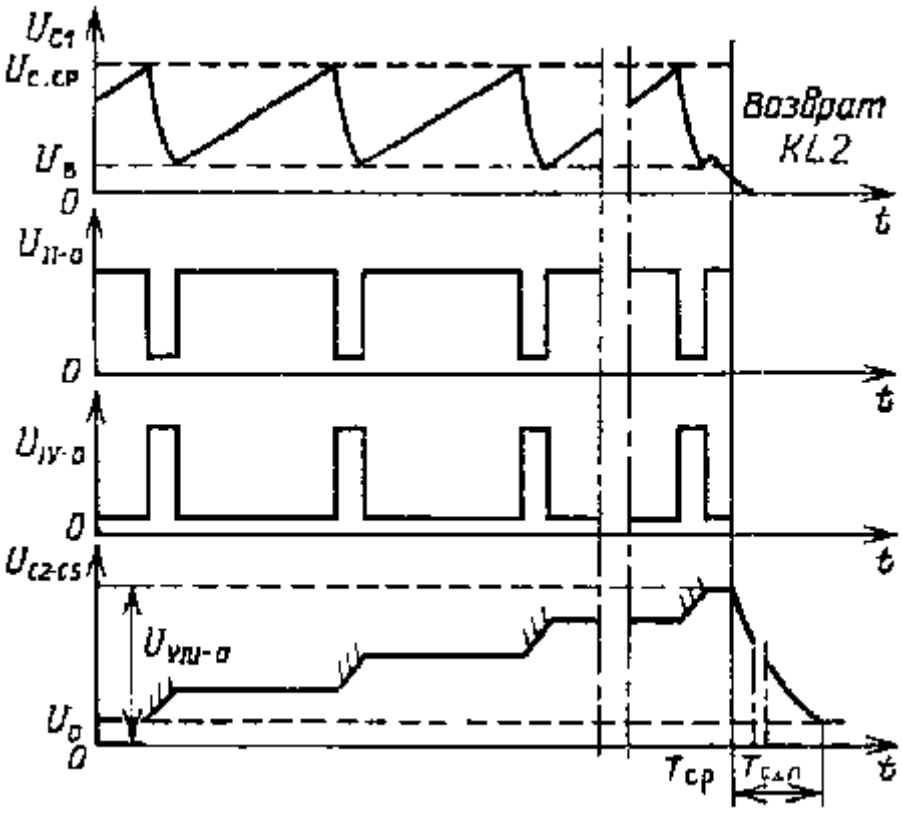


Рис. 12.21. Графики зависимости U_{C1} =f(t); U_{II-0} =f(t); U_{IV-0} =f(t); U_{C2-C5} =f(t)

Блокинг-генератор является источником коммутирующих импульсов. Он выполнен на транзисторе VT7, включенном по схеме с общей базой. Во время паузы модулятора транзистор VT7 закрыт отрицательным смещением, поданным от транзистора VT6 через диод VD12, обмотку импульсного трансформатора TL1 и резисторы R19, R20. Во время импульса модулятора VD12 закрыт положительным напряжением, а конденсатор C3 начинает заряжаться через резисторы R17 и R19. Когда напряжение на конденсаторе C3 превысит напряжение на стабилитроне VD14, транзистор VT7 открывается и за счет положительной обратной связи между цепями коллектора и эмиттера генерирует импульс через импульсный трансформатор TL1. Длительность импульса определяется временем разряда конденсатора C3 через резистор R20, переход эмиттер - база транзистора VT7 и индуктивность трансформатора TL1. По окончании импульса транзистор VT7 закрывается и снова начинает заряжаться конденсатор C3. Длительность паузы между импульсами определяется временем заряда конденсатора. В режиме паузы модулятора конденсатор C3 разряжается через резистор R19, диод VD12 и транзистор VT6.

Выходной триггер (блок Б3) выполнен на транзисторах VT1 и VT2 с коллекторной R3 и эмиттерной R5 обратной связью. В нормальном режиме транзистор VT1 открыт током смещения, поступающим через катушку реле KL5, резисторы R9 и R3, а транзистор VT2 закрыт. Во время паузы ЧИМ через насыщенный транзистор VT6, резисторы R2, R1, R3 и диоды VD1, VD2 на базу VT1 подается дополнительный ток смещения, который загрубляет триггер, переводя транзистор VT1 в режим глубокого насыщения. Во время импульса ЧИМ дополнительный ток смещения исчезает и чувствительность триггера повышается. Если в этот момент от блокинг-генератора на вход триггера через конденсатор связи C1 поступит коммутирующий импульс, достаточный для уменьшения тока базы транзистора VT1 до нуля, последний закроется и откроется транзистор VT2, который будет удерживаться током смещения через резисторы R6 и R7. При опрокидывании триггера сработает выходное реле KL5 и

Файл скачан с www.turbinist.ru

самоудержится через свой замыкающий контакт. Чтобы предотвратить возврат триггера во время паузы ЧИМ, дополнительный ток смещения отводится от базы транзистора VT1 через открытый диод VD2 и коллекторный переход транзистора VT2. Помехоустойчивость триггера обеспечивается шунтированием обмотки выходного реле триггера конденсатором С3, за счет чего создается замедление срабатывания реле. Так как длительность переключающих импульсов блокинг-генератора мала, то для заряда С3 через резистор R9 и коллектор транзистора VT2 требуется 3-4 переключающих импульса. При кратковременной одиночной помехе конденсатор С3 не успевает зарядиться и триггер не зафиксируется в сработавшем состоянии. При срабатывании триггера от интегратора поступает пакет из 5-10 импульсов - этого достаточно для нормальной работы схемы.

Возврат триггера происходит за счет снятия напряжения питания при размыкании замыкающего контакта пускового органа KL2. При подаче напряжения питания возникновение отпирающего тока в цепи базы транзистора VT2 задерживается на время заряда конденсатора С13 через резистор R6, что вполне достаточно для отпирания транзистора VT1 и установки триггера в начальное положение. Разряд конденсатора С13 происходит через резистор R57, диод VD17 и размыкающий контакт KL2.

Проверка ЧИМ заключается в измерении осциллографом амплитуды и продолжительности импульсов, а также длительности пауз между импульсами. Проверка производится при поданном на вход блок-реле токе 0,5 I_{*2} и I_{*2} и напряжении постоянного тока 220 В. Осциллограф подключается к зажиму 28 и контрольной точке IV (измеряется напряжение коллектор-эмиттер транзистора VT6). Амплитуды и продолжительность импульсов должны быть постоянны, а длительность пауз должна изменяться обратно пропорционально входному току.

При проверке блокинг-генератора осциллограф подключается к контрольной точке HVI и зажиму 28. Для создания на выходе блокинг-генератора непрерывных импульсов необходимо зажим 28 соединить с контрольной точкой II. В этом случае транзистор VT6 закроется и на выходе ЧИМ появится постоянный сигнал. Продолжительность импульсов должна находиться в пределах 8-12мкс, паузы - 500-700 мкс, амплитуда импульсов составляет 0,8-1,5 В.

Проверка времени срабатывания интегрального органа производится на максимальной уставке по постоянной величине А при имитации КЗ на фазах АВ с пересчетом на ток обратной последовательности (см. настройку уставок органов с независимой выдержкой времени) при I_{*2}=1. Предварительно проверяется и в случае необходимости регулируется резистором R23 потенциал между зажимом 28 и контрольной точкой VII, который должен находиться в пределах 19,5-20 В. Время срабатывания интегрального органа, рассчитанное по формуле $t_{ср}$ = A/I_{*2}^2=А, должно быть меньше величины А на 3%. Регулировка времени срабатывания осуществляется переменным резистором R4 (изменение зарядных токов). Для сокращения времени настройки необходимо между измерениями включать на 3-7 с между точкой Б (блок Б2) и зажимом 34 через нефиксированную кнопку разрядный резистор МЛТ-0,5 (51 кОм). Промежутки между измерениями в этом случае должны быть 10-15 с.

Временная характеристика интегрального органа проверяется на заданной уставке по постоянной величине А. При токе обратной последовательности I_{*2}=1 резистором R23 добиваются времени срабатывания интегрального органа на 3 % меньше заданной уставки по величине А. Затем снимается временная характеристика при токах I_{*2}, равных 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0, и имитации КЗ на фазах АВ, ВС, СА. В случае отклонения характеристики от расчетной на 10 % и более в ту или иную сторону производится ее корректировка в необходимую сторону при I_{*2} = 1. Расчетная зависимость времени срабатывания интегрального органа приведена на рис. 12.22.

Файл скачан с www.turbinist.ru

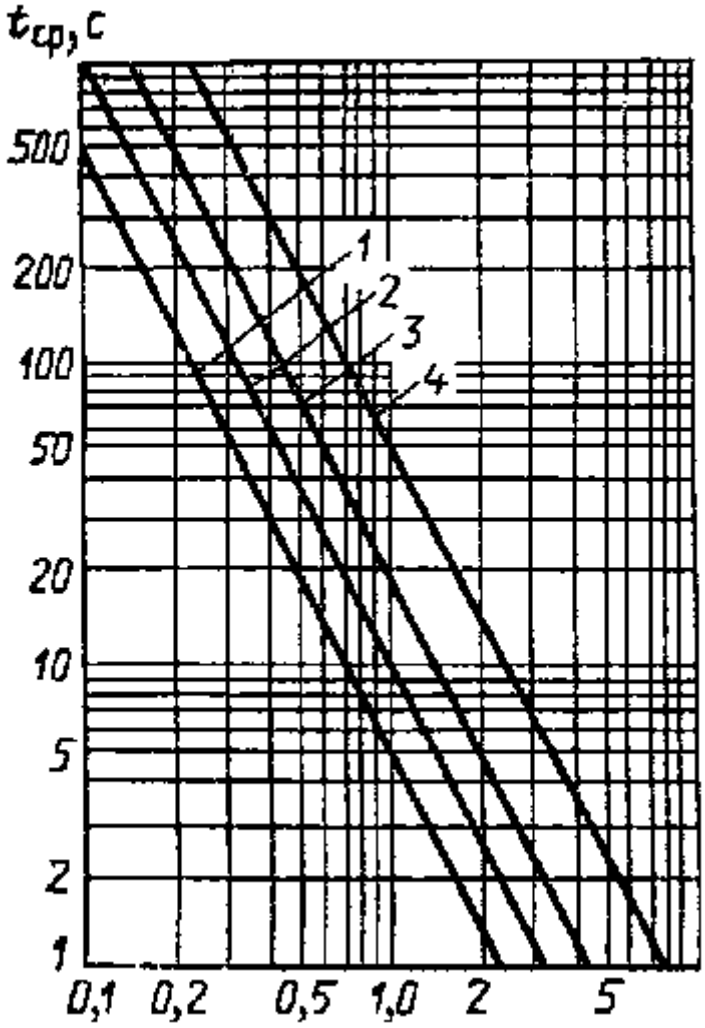


Рис. 12.22. Кривые зависимости времени срабатывания интегрального органа от кратности тока обратной последовательности:

1 - для А-5; 2 - для А-10; 3 - для А-20; 4 - для А-45

При проверке времени срабатывания интегрального органа при импульсном воздействии тока обратной последовательности пусковой орган KL2 должен быть подтянут во избежание разряда конденсаторов по цепи полного охлаждения ротора после устранения несимметричного режима.

Проверка уставки по времени полного охлаждения производится в следующей последовательности:

измеряется время срабатывания T_1 интегрального органа при токе обратной последовательности 0,3-0,5 I_{*2} как среднее трех измерений. В промежутках между измерениями разрядную цепь интегрального органа необходимо шунтировать резистором 51 кОм;

при том же токе обратной последовательности производится по три измерения времени срабатывания интегрального органа с перерывами между моментом возврата пускового органа и его последующего пуска, равными минимальным и максимальным значениям, приведенным в табл. 12.2. Среднее значение времени срабатывания интегрального органа T_2 (минимальный

Файл скачан с www.turbinist.ru

перерыв) должно быть меньше 0,95 T_1, а T_3 (максимальный перерыв) - больше или равно 0,95 T_1.

Проверка блок-реле на работающем генераторе совмещается с опытом трехфазного КЗ блока генератор-трансформатор. В объем проверки входит измерение напряжения небаланса ФТОП, проверка токов срабатывания органов с независимой выдержкой времени, проверка времени срабатывания интегрального органа.

Таблица 12.2. Характеристика полного охлаждения блок-реле

Исполнение блок-реле по постоянной А	Уставка по А	Время полного охлаждения $T_{охл}$, с
5-10	5	От 126 до 234
	10	От 168 до 312
10-20	10	От 126 до 234
	20	От 168 до 312
20-45	20	От 115 до 215
	45	От 168 до 312

Измерение напряжения небаланса ФТОП производится при токе прямой последовательности, равном номинальному. Напряжение небаланса, измеренное вольтметром с $R_{вн} \geq$ 20 кОм/В, на зажимах 20-22 (рис. 12.18) не должно превышать 1,3 В.

Перед проверкой токов срабатывания органов с независимой выдержкой времени необходимо на испытательном блоке перекрестить две фазы токовых цепей и в одну из фаз включить контрольный амперметр. Плавно увеличивая ток генератора, измеряют токи срабатывания органов отсечек. Токи срабатывания пускового и сигнального органов не проверяются ввиду их незначительности.

Проверка времени срабатывания интегрального органа производится по схеме рис. 12.23 при токах 0,5-0,6 $I_{ном}$ и $I_{ном}$. Разница в показаниях секундомера при указанных токах не должна превышать 10%.

Файл скачан с www.turbinist.ru

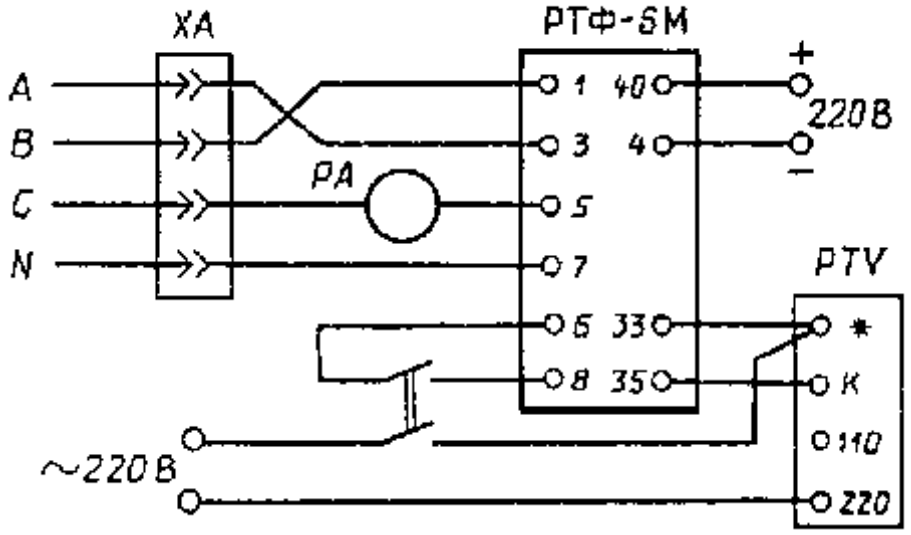


Рис. 12.23. Схема проверки времени срабатывания интегрального органа на работающем генераторе

По окончании проверок все цепи восстанавливаются и производится повторное измерение напряжения небаланса ФТОП.

12.5. Блок-реле типа РЗР-1М

Как отмечалось выше, турбогенераторы с непосредственным охлаждением обмоток характеризуются малой перегрузочной способностью. Для защиты ротора турбогенератора от повреждений при перегрузках по току возбуждения применяется блок-реле типа РЗР-1М. Защита автоматически ограничивает длительность режима форсировки возбуждения в зависимости от кратности тока ротора по отношению к его номинальному значению и отключает генератор от сети с гашением поля при авариях в системе возбуждения, вызывающих длительное протекание по обмотке ротора тока недопустимой величины. Ток ротора подается в защиту от датчика тока. Структурная схема блок-реле приведена на рис. 12.24. В состав комплекта РЗР-1М входят следующие элементы:

Файл скачан с www.turbinist.ru

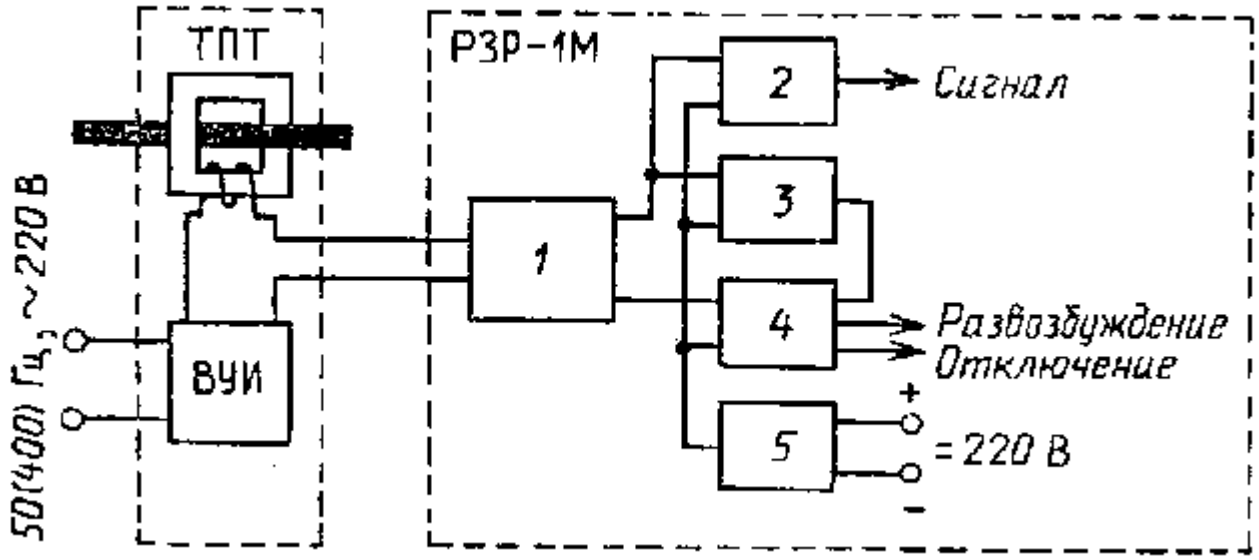


Рис. 12.24. Структурная схема блок-реле РЗР-1М:

1 - входное преобразовательное устройство; 2 - сигнальный орган;
3 - пусковой орган; 4 - интегральный орган; 5 - блок питания

входное преобразовательное устройство, служащее: для гальванического разделения входных цепей основных органов реле, имеющих связь по цепям питания; для компенсации несоответствия между номинальными токами ротора генератора и устройства для измерения тока ротора; ..... генератора выше его длительно допустимого значения;

пусковой орган, контролирующий пуск и возврат интегрального органа реле;

интегральный орган, учитывающий накопление тепла в обмотке ротора в процесе перегрузки и охлаждение ротора после устранения перегрузки. Интегральный орган имеет две ступени срабатывания, одна из которых действует на развозбуждение генератора, а вторая - на отключение генератора от сети и гашение поля;

блок питания, служащий для получения необходимых уровней стабилизированного напряжения постоянного тока для питания основных органов и их выходных реле.

В качестве датчика тока при тиристорном и высокочастотном возбуждении используется трансформатор постоянного тока (ТПТ), поставляемый в комплекте с вспомогательным устройством (ВУИ). Трансформатор постоянного тока представляет собой магнитный усилитель, в котором управляющей обмоткой является токоведущий стержень, по которому протекает ток ротора. Стержень проходит внутри двух замкнутых магнитопроводов, выполненных из ферромагнитного материала с высокой проницаемостью. Рабочая обмотка расположена на обоих магнитопроводах, причем на каждом магнитопроводе намотано четыре секции, соединенные между собой параллельно. Между собой обмотки обоих магнитопроводов могут быть соединены либо последовательно-встречно (ТПТ типа И514/1,5; И514/2,0; И514/2,5), либо параллельно (ТПТ типа И514/3; И514/4; И514/6 и И528). Параллельное включение обмоток на каждом магнитопроводе уменьшает влияние на трансформатор внешних магнитных полей и асимметрии расположения шины в окне трансформатора. Рабочая обмотка питается от источника переменного напряжения через вспомогательное устройство, содержащее автотрансформатор, два трансформатора переменного тока, систему выпрямителей и токоограничивающих сопротивлений к ним (рис. 12.25). В зависимости от величины первичного (постоянного) тока изменяется степень ..... магнитную проницаемость материала магнитопровода. Это вызывает изменение реактивного сопротивления трансформатора, в

Файл скачан с www.turbinist.ru

результате чего происходит изменение переменного тока в рабочей обмотке трансформатора. Для предотвращения трансформации переменного тока из рабочей обмотки в управляющую соединение обмоток, размещенных на разных магнитопроводах, выполняется встречно. При таком включении обмоток МДС, создаваемые управляющей и рабочей обмотками, в одном из сердечников будут суммироваться, а в другом - вычитаться, что приведет к наведению в управляющей обмотке встречных взаимно компенсирующихся ЭДС.

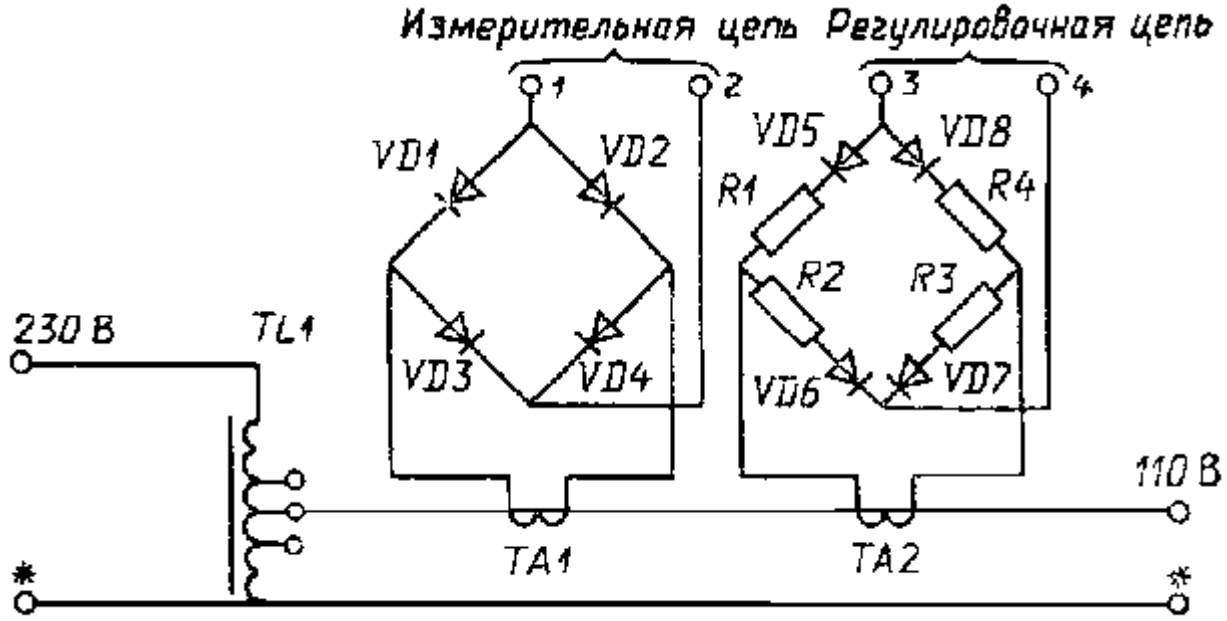


Рис. 12.25. Вспомогательное устройство ВЧИ

Все качественные показатели устройства нормируются заводом-изготовителем по среднему значению тока рабочей обмотки. Однако при использовании устройств в качестве датчиков входной величины выпрямленный ток на выходе ВУИ, пропорциональный току ротора, необходимо сглаживать. Значение сглаженного тока зависит от коэффициента формы кривой входного сигнала, а линейность характеристик преобразования - от постоянства коэффициента формы при изменении первичного тока в заданном диапазоне. Форма кривой тока рабочей обмотки при последовательном и параллельном соединении обмоток сердечников ТПТ существенно различается. Она определяется изменениями магнитного состояния сердечников. При параллельном соединении ток в рабочей обмотке каждого сердечника и форма его кривой не зависят от другого сердечника. Кривая тока имеет вид отрезков полуволн синусоиды с изменяющимися амплитудой и углом отсечки в зависимости от значений измеряемого постоянного тока и напряжения питания рабочих обмоток. При этом коэффициент формы кривой, амплитудное и действующее значения тока рабочей обмотки, непосредственно подающегося в защиту, не пропорциональны измеряемому току и зависят от частоты, напряжения питания и сопротивления нагрузки. При последовательном соединении по рабочим обмоткам обоих сердечников проходит один и тот же ток, который не может иметь такие же отличия от синусоиды, как суммарный ток рабочих обмоток при параллельном соединении. Ток рабочей обмотки имеет трапецеидальную форму. Этому соответствуют примерно одинаковые среднее, действующее и амплитудное значения тока, которые практически не зависят от частоты, напряжения питания ТПТ и сопротивления нагрузки. Кроме того, ТПТ с последовательным и параллельным соединением рабочих обмоток ведут себя по-разному при переходных процессах, вызванных подачей, снятием либо скачкообразным изменением питающего переменного напряжения или подачей и снятием первичного постоянного тока. При последовательной схеме соединения переходный процесс практически отсутствует и выходной сигнал полностью повторяет измеряемый ток без искажений, а колебания питающего

Файл скачан с www.turbinist.ru

напряжения в допустимых пределах не влияют на выходной сигнал. При параллельном соединении при подаче измеряемого тока выходной сигнал появляется с запаздыванием и нарастает до установившегося значения с некоторой постоянной времени. При отключении измеряемого тока выходной сигнал также спадает по экспоненте. При скачкообразном изменении питающего напряжения в выходном сигнале появляются выбросы, амплитуда которых в несколько раз может превышать установившееся значение выходного сигнала. Эти выбросы сравнительно медленно затухают во времени и могут приводить к ложной работе защит и систем, включенных на выходе устройства.

В связи с вышеизложенным питание входных цепей защиты типа РЗР-1М, а также измерителя перегрузки ротора (ИПР) в системе автоматического регулятора возбуждения от ТПТ с параллельным соединением рабочих обмоток недопустимо. Поэтому до выпуска промышленностью ТПТ на номинальные токи 3 кА и более с последовательным соединением обмоток необходимо осуществлять переключение обмоток сердечников ТПТ с параллельной схемы на последовательную. При этом сохраняются все свойства ТПТ, а его параметры изменяются следующим образом:

номинальный вторичный ток уменьшается в 2 раза;

оптимальное напряжение питания вторичной цепи ТПТ от автотрансформатора ВУИ возрастает в 2 раза (выполняется переходом на другое ответвление автотрансформатора);

максимально допустимое приведенное сопротивление вторичной цепи возрастает в 4 раза.

При бесщеточном возбуждении в качестве датчика используется индукционный короткозамкнутый датчик тока ИКДТ (рис. 12.26), представляющий собой неподвижную короткозамкнутую “беличью клетку”, которая охватывает вал генератора. Внутри беличьей клетки проходят провода от возбудителя к обмотке ротора. При работе генератора ток возбуждения создает вращающееся магнитное поле, индуцирующее токи в стержнях беличьей клетки. Эти токи замыкаются через трансформатор тока, во вторичную цепь которого включается защита РЗР-1М. С помощью ИКДТ на защиту подается синусоидальный переменный ток, пропорциональный току ротора.

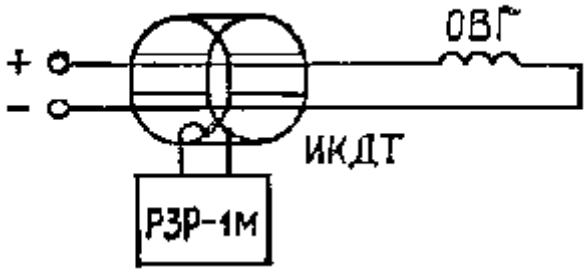


Рис. 12.26. Схема включения индукционного короткозамкнутого датчика тока ИКДТ

В состав входного преобразовательного устройства (ВПУ), показанного на рис. 12.27, входят промежуточный трансформатор TL1, согласующий трансформатор напряжения TV2, выпрямительные мосты VC1, VC2, сглаживающие конденсаторы C1, C2 и резисторы R1, R2, R4-R6. Трансформатор TL1 служит для изменения уровня контролируемых токов до значений, удобных для дальнейшего преобразования и регулировки. Трансформатор TV2 осуществляет гальваническое разделение входных цепей основных органов реле. Регулируемые резисторы R1 и R2 позволяют получить необходимые уровни напряжений на входах основных органов реле при номинальном токе ротора. Резистором R5 устанавливается требуемая стабилизация напряжения на входе интегрального органа (изменение масштаба входного напряжения).

Файл скачан с www.turbinist.ru

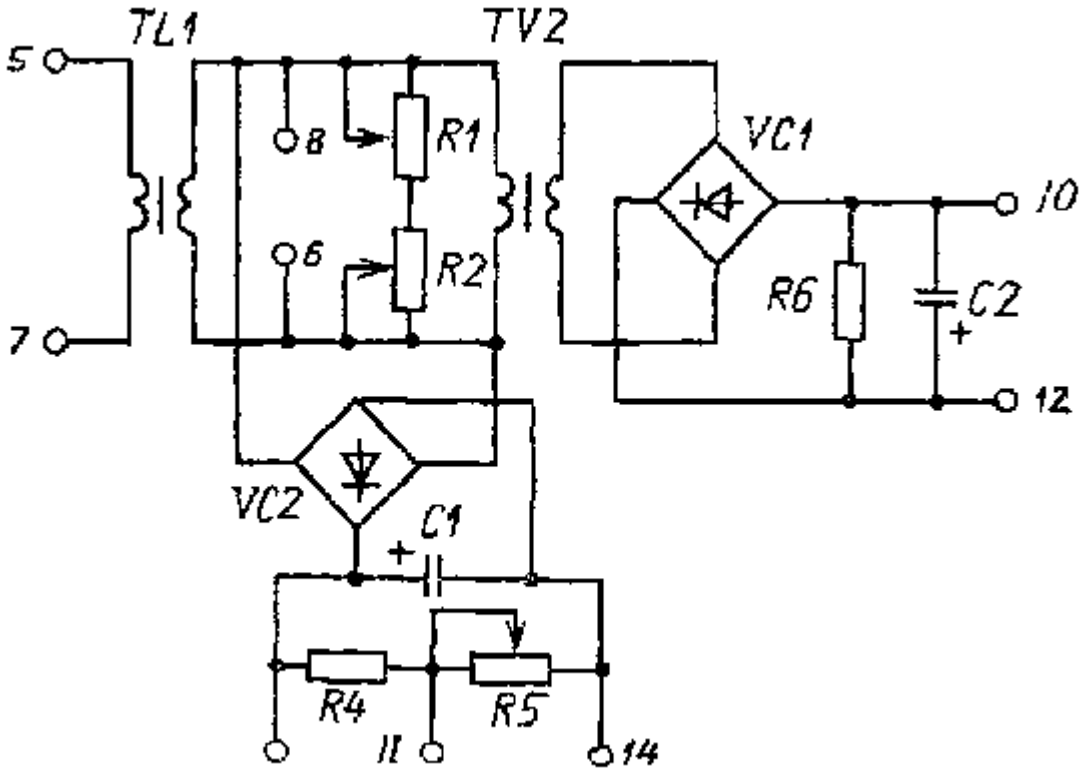


Рис. 12.27. Входное преобразовательное устройство РЗР-1М

Принципы выполнения и построения схем основных органов и блока питания защиты РЗР-1М аналогичны примененным в токовой защите обратной последовательности, выполненной на блок-реле типа РТФ-6М. Отличие заключается в следующем: в защите РЗР-1М имеется всего два органа с независимой выдержкой времени: пусковой и сигнальный; на пусковой и сигнальный органы подается напряжение 35 В (вместо 80 В у защиты РТФ-6М).

Интегральный орган учитывает накопление тепла в обмотке ротора при перегрузке и охлаждение ротора после устранения перегрузки. Зависимая от тока характеристика выдержек времени срабатывания интегрального органа соответствует выражению

$$t_{ср} = \frac{A}{\left[K(I_{*р} - B)\right]^2} = \frac{A}{I_{вх}^2},$$

где А - постоянная, учитывающая накопление тепла в роторе; К, В - коэффициенты, зависящие от вида характеристик и диапазона уставок; $I_{*р} = I_{рот} / I_{рот.ном}$ - относительный ток ротора; $I_{вх} = К(I_{*р} - В) = КI_{*р} - С$ при $КI_{*р} > С$.

Для получения характеристики по выражению $t_{ср} = A/I_{вх}^2$ в схеме интегрального органа используется заряд конденсатора импульсами тока постоянной длительности, частота и амплитуда которых пропорциональны входному сигналу $I_{вх}$. Выражение $I_{вх} = КI_{*р} - С$ описывает кусочно-линейное преобразование во входной сигнал интегрального органа, которое необходимо осуществить с входным напряжением, пропорциональным току ротора. Указанное преобразование осуществляется с помощью стабилитрона VD1, включенного последовательно в

Файл скачан с www.turbinist.ru

цепь входного тока интегрального органа. Допуск на напряжение стабилизации осуществляется резистором R5 в схеме ВПУ, а подстройка входного тока - резистором R3.

Схема интегрального органа представлена на рис. 12.28. Реализация характеристик выдержек времени осуществляется аналогично защите с блок-реле РТФ-6М. Интегральный орган состоит из частотно-импульсного модулятора, блокинг-генератора, двух триггеров и двух выходных реле. Принцип действия устройств и выполнение схем указанных узлов интегрального органа идентичны примененным в защите РТФ-6М. Однако в интеграторе защиты РЗР-1М делитель опорного напряжения (VD13, VD14, R19-R28) собран по другой схеме в связи с наличием второй ступени защиты. При заряде конденсаторов С2-С5, когда их напряжение превысит уровень напряжения на движке потенциометра R25, откроются диоды VD2, VD4 в блоке Б2 и коммутирующие импульсы блокинг-генератора попадут на вход триггера первой ступени (блок Б3) и опрокинут его. При этом сработает и самоудержится выходное реле KL3 первой ступени и защита действует на развозбуждение генератора. При срабатывании KL3 плюс через его контакты попадет на диод VD4, который запирается и отключает конденсаторы С2-С5 от потенциометра R25. Если перегрузка осталась неустраненной, конденсаторы С2-С5 заряжаются импульсами тока до срабатывания выходного триггера второй ступени (блок Б4) и выходного реле второй ступени KL4. Уставки интегрального органа устанавливаются для первой ступени защиты потенциометром R25, а для второй ступени - потенциометром R22. Время срабатывания первой ступени всегда меньше времени срабатывания второй ступени, так как делитель опорного напряжения выполнен так, что опорное напряжение первой ступени является частью (0,7-0,8) опорного напряжения второй ступени.

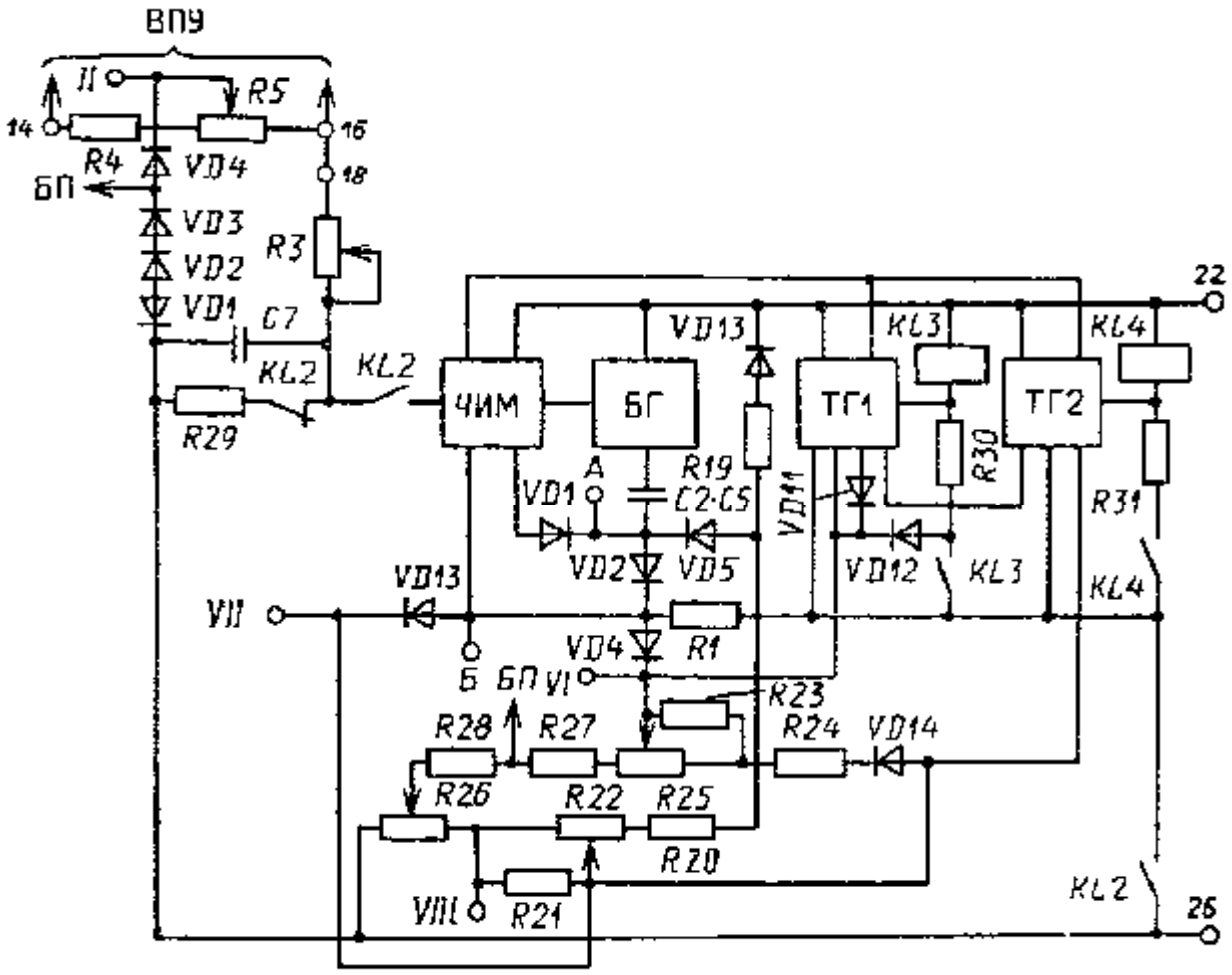


Рис. 12.28. Интегральный орган РЗР-1М

Файл скачан с www.turbinist.ru

Проверка и настройка характеристик блок-реле РЗР-1М производится аналогично проверке и настройке блок-реле РТФ-6М. Различие заключается в подаваемом на вход блок-реле токе и в устанавливаемых уровнях напряжений в контрольных точках.

При проверке блока питания уровни напряжений в контрольных точках должны соответствовать данным, приведенным ниже:

Место измерения*	I-III	22-20	22-26	22-VI	22-VII	22-VIII	22-I
Напряжение, В	35±0,5	11,5-14	24-30	15,5-16	19,5-20	20,5-21	10±0,5
Орган регулирования	R20	-	-	R25	R22	R26	R13

* Здесь и далее обозначения выводов, точек и разъемов указаны в соответствии с заводской документацией.

Напряжения измеряются вольтметром постоянного тока с $R_{вн} \geq$ 20 кОм/В (М1200, М1201, М2038 и др.).

Установка уровней напряжения осуществляется при сработавшем реле KL2. Для его срабатывания необходимо замкнуть зажим 1 с контрольной точкой 1 на плате П5.

Проверка входного преобразовательного устройства производится подачей на вход блок-реле (зажимы 5-7) переменного синусоидального тока промышленной частоты, соответствующего номинальному току ротора генератора. Регулировкой переменных резисторов R1 и R2 на зажимах 10-12 устанавливается напряжение, равное $16 \pm 0{,}5$ В.

Для последующей коррекции уставки, связанной с различием формы кривой тока при наладке и рабочем режиме, снимается характеристика $U_{10-12} = f(I_{вх})$.

Настройка уставок сигнального и пускового органов производится подачей на зажимы 5-7 переменного синусоидального тока, рассчитываемого по формуле

$$I_{ср} = I_{*р} I_{ном}.$$

Регулировка уставок осуществляется переменными резисторами R11 и R18. Срабатывание реле фиксируется по срабатыванию соответствующих выходных реле KL1 и KL2. Уставка сигнального органа всегда должна быть меньше уставки пускового органа.

Проверка ЧИМ производится измерением длительности импульсов и пауз при подаче на вход блок-реле значений тока, достаточных для срабатывания пускового органа. Осциллограф подключается к контрольной точке III и зажиму 22. Длительность импульсов должна оставаться постоянной, а длительность пауз должна изменяться обратно пропорционально входному току.

При проверке блокинг генератора осциллограф подключается к контрольной точке IV и зажиму 22. Контрольную точку II необходимо соединить с зажимом 22. Длительность паузы должна быть в пределах 500-700 мкс, а амплитуда импульсов - в пределах 0,8-1,5В.

Время срабатывания интегрального органа калибруется на максимальной уставке в следующей последовательности:

в рассечку перемычки между зажимами 16-18 включается микроамперметр и на вход блок-реле (зажимы 5-7) подается ток, соответствующий 0,8 номинального тока ротора;

Файл скачан с www.turbinist.ru

регулировкой переменного резистора R5 ток в цепи микроамперметра снижается до нуля;

микроамперметр отключается и на вход блок-реле подается ток, соответствующий двукратному номинальному току ротора;

изменяя резистором R3 зарядные токи ЧИМ и интегратора, добиваются времени срабатывания второй ступени 19-21 с (28,5-31,5 с).

С целью сокращения времени настройки интегрального органа необходимо между измерениями включать на 5-10 с между точкой Б блока Б2 и зажимом 24 через нефиксируемую кнопку разрядный резистор МЛТ-0,5 - 100 кОм. Очередной пуск блок-реле в этом случае должен производиться не ранее чем через 20 с.

По окончании калибровки интегрального органа проверяются временные характеристики обеих ступеней при токах, соответствующих относительным токам ротора 1,1; 1,2; 1,5 и 2,0. Время срабатывания первой и второй ступеней должно соответствовать данным табл. 12.3.

Таблица 12.3. Временная характеристика интегрального органа

Исполнение блок-реле	Ступень защиты	Время срабатывания интегрального органа, с, при токе ротора $I_{*р}$			
		1,1	1,2	1,5	2,0
I	I	480	215	50	16
	II	600	265	60	20
II	I	480	250	74	24
	II	600	310	92	30

Проверка уставки по времени полного охлаждения производится по времени срабатывания второй ступени при токе ротора $I_{*р}$ =1,5 в следующей последовательности:

измеряется время срабатывания как среднее значение трех измерений с включением в промежутках между измерениями разрядного резистора 100 кОм;

повторяются по три измерения с промежутками между ними, равными 450 и 750 с. При этом время срабатывания второй ступени должно отличаться от предыдущих измерений более чем на 5% при промежутке 450 с ($t_2 < 0{,}95\ t_1$) и не более чем на 5% при промежутке 750 с ($t_3 \geq 0{,}95\ t_1$).

Проверка блок-реле на работающем генераторе производится совместно с датчиком тока. В связи с тем что настройка и регулировка блок-реле производилась подачей на его вход переменного синусоидального тока промышленной частоты, не учитывающего форму кривой тока в рабочем режиме, необходимо произвести коррекцию уставки. Для этого при номинальном токе ротора необходимо регулировкой резисторов R1 и R2 на зажимах 10-12 выставить напряжение, равное $16 \pm 0{,}5$ В, изменяя ток ротора, снять характеристику $U_{10-12} = f(I_{рот})$ и сравнить ее с характеристикой $U_{10-12} = f(I_{вх})$, снятой при проверке ВПУ, затем плавным увеличением тока ротора проверить уставки срабатывания сигнального и пускового органов.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Раздел тринадцатый

НАЛАДКА УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ

13.1. Общие сведения

Строительство электрических подстанций напряжением до 110 кВ с короткозамыкателем и отделителем на стороне высокого напряжения не требует наличия мощного источника питания приводов выключателей с большими токами потребления, в связи с чем такие подстанции стремятся проектировать на переменном оперативном токе и, как правило, без оперативного обслуживания. Оперативные сигналы передаются на диспетчерские пункты с помощью телемеханики.

В настоящее время существуют следующие основные способы выполнения релейной защиты на переменном оперативном токе:

1) использование реле прямого действия, встроенных в приводы выключателей, отделителей, короткозамыкателей. Применяются типы реле РТМ, РТВ;

2) применение схем с дешунтированием катушки отключения выключателя, включенной во вторичную цепь трансформаторов тока защищаемого присоединения;

3) использование блоков питания оперативных цепей, запитываемых от трансформаторов тока и напряжения, а также от трансформаторов собственных нужд, имеющих надежный источник питания с автоматическим включением резерва (АВР);

4) использование энергии предварительно заряженных конденсаторов - применяется в качестве резервного источника питания совместно с блоками заряда при включении выключателя на КЗ и низкой посадке напряжения оперативного тока для обеспечения надежного отключения выключателя;

5) использование комплектных устройств питания электромагнитов включения выключателей 6-10 кВ типа УКП.

13.2. Аппаратура, применяемая в устройствах РЗА на переменном оперативном токе

Встроенные реле прямого действия. Реле прямого действия встраиваются в приводы выключателей 6-10 и 35 кВ типа ППМ-10, ПП-67 К, ПП-67, ПП-61, ПП-61 К, ВМП10П, ВМПП-10, ВММ-10, ППВ-10.

Например, в состав привода ПП-67 входят: электромагнит включения 220 В, электромагнит отключения 220 В, электромагнит релейного отключения 220 В, двигатель завода пружины 220 В, вспомогательные контакты выключателя КСА-10, вспомогательные контакты аварийного отключения КСА-2, вспомогательные контакты готовности привода КСА-4, два реле максимального тока мгновенного действия 220 В, 5 А типа РТМ.

Для управления отделителями и короткозамыкателями применяются приводы типа ШПО, имеющие встроенные электромагниты отключения 220 В, а также привод типа ШПК, имеющий два встроенных реле максимального тока мгновенного действия РТМ с минимальным током

Файл скачан с www.turbinist.ru

срабатывания 5 А (или 3,5 А), и электромагнит включения короткозамыкателя 220 В соответственно.

Таблица 13.1. Основные технические данные реле РТМ к приводам ПП-61, ПП-67 и ПП-61К, ПП-67К

Вариант исполнения	Номинальный воздушный зазор, мм	Уставка тока срабатывания по отпайкам, А	Пределы регулирования тока срабатывания воздушным зазором		Потребляемая мощность при токе срабатывания, В·А		Сопротивление при токе срабатывания, Ом		Обмоточные данные	
			Зазор, мм	Ток срабатывания, А	Сердечник отпущен	Сердечник подтянут	Сердечник отпущен	Сердечник подтянут	Число витков	Диаметр провода, мм
РТМ-I	36	5	34-47	4,8-7,4	16	58	0,64	2,32	257	1,56
		7,5		7,2-10,8	20	67	0,36	1,19	184	
		10		9,6-15,5	28	90	0,28	0,9	155	
		15		14,6-22	26	73	0,12	0,32	92	
РТМ-II	36	10	34-47	9,2-14,4	23	71	0,23	0,71	150	1,81
		15		14,2-20,5	20	62	0,089	0,275	105	
		20		18,4-30,5	28	79	0,07	0,197	75	
		25		23-41	40	100	0,064	0,16	68	
РТМ-III	40	30	34-47	25-38	66	220	0,073	0,245	76	1,81
		40		33-58	108	310	0,068	0,193	69	
		50		43-67	143	345	0,057	0,138	57	
		60		54-81	104	200	0,029	0,056	30	
РТМ-IV	52	75	44-57	54-108	210	570	0,0375	0,1	57	2,44
		100		68-150	365	800	0,0365	0,08	51	
		125		94-200	420	800	0,027	0,05	36	
		150		104-260	330	570	0,015	0,024	20	
ТЭО-I	36	1,5	34-47	1,4-2,1	20	-	-	-	900	0,9
ТЭО-II	36	3	34-47	2,9-4,5	20	-	-	-	450	1,08

Примечание. Для намотки катушек применяется провод марки ПЭЛБО или ПБД.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Таблица 13.2. Основные технические данные реле РТВ к приводам ПП-61, ПП-67 и ПП-61К

Вариант исполнения реле	Уставка тока срабатывания по отпайкам, А	Потребляемая мощность при токе срабатывания, В·А		Сопротивление при токе срабатывания, Ом		Обмоточные данные		
		Сердечник отпущен	Сердечник подтянут	Сердечник отпущен	Сердечник подтянут	Число витков	Марка провода	Диаметр провода, мм
РТВ-I РТВ-IV	5 6 7,5 10	40 36 41 40	112 101 118 113	1,6 1,0 0,73 0,4	4,45 2,8 2,1 1,13	307 258 218 156	ПЭЛБО	1,81
РТВ-II РТВ-V	10 12,5 15 17,5	40 40 44 45	114 114 125 125	0,4 0,26 0,2 0,15	1,14 0,73 0,555 0,41	151 120 106 92	ПБД	2,44
РТВ-III РТВ-VI	20 25 30 35	37 41 44 52	107 116 126 142	0,092 0,066 0,049 0,043	0,268 0,186 0,14 0,116	69 59 52 48	ПБД	2,44

Примечания: 1. Независимая часть характеристики у реле РТВ разных исполнений начинается при кратности тока реле к току срабатывания, равной 1,2-1,7 и 2,5; 3,5 для реле РТВ-I, РТВ-II, РТВ-III и РТВ-IV, РТВ-V, РТВ-VI соответственно. Выдержка времени регулируется плавно от 0 до 4 с, разброс по времени в независимой части характеристики составляет $\pm$ 0,3 с для ПП-61 и $\pm$ 0,2 с для ПП-67.

2. Коэффициент возврата реле при работе в зависимой части характеристики - 0,6; в независимой части - 0,75-0,8 и 0,95-0,98 для реле РТВ-I - РТВ-III и РТВ-IV - РТВ-VI соответственно.

В табл. 13.1, 13.2 приведены основные технические данные реле прямого действия и электромагнитов дистанционного управления.

Реле времени РВМ-12 и РВМ-13. Реле времени РВМ-12 имеет максимальную выдержку времени 4 с и реле типа РВМ-13 - 10 с. Максимальный разброс времени срабатывания реле от тока срабатывания до тока, соответствующего 20-кратному току по отношению к току срабатывания, для реле РВМ-12 составляют 0,12 с и для реле РВМ-13 - 0,25 с.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Реле надежно работает при последовательном соединении секций трансформаторов реле при токах 2,5 А и более и при параллельном соединении - при токах 5 А и более. Потребление реле при токе, равном двукратному току по отношению к току срабатывания, не превышает 8 В·А. Реле допускает длительное протекание по первичным обмоткам насыщающихся трансформаторов тока 10 А и в течение 10 с - тока 75 А (при последовательном соединении секций первичных обмоток). Длительно допустимый ток через контакты - 5 А.

Основным элементом является синхронный электродвигатель М, который запускается с помощью контактов реле тока. Ротор синхронного электродвигателя вращается с определенной скоростью, что обеспечивает точность установленной выдержки времени. Реле имеет также два насыщающихся трансформатора Т1 и Т2. Схема реле приведена на рис. 13.1.

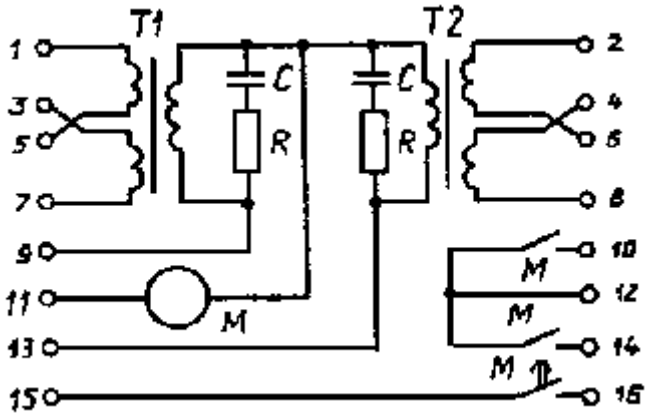
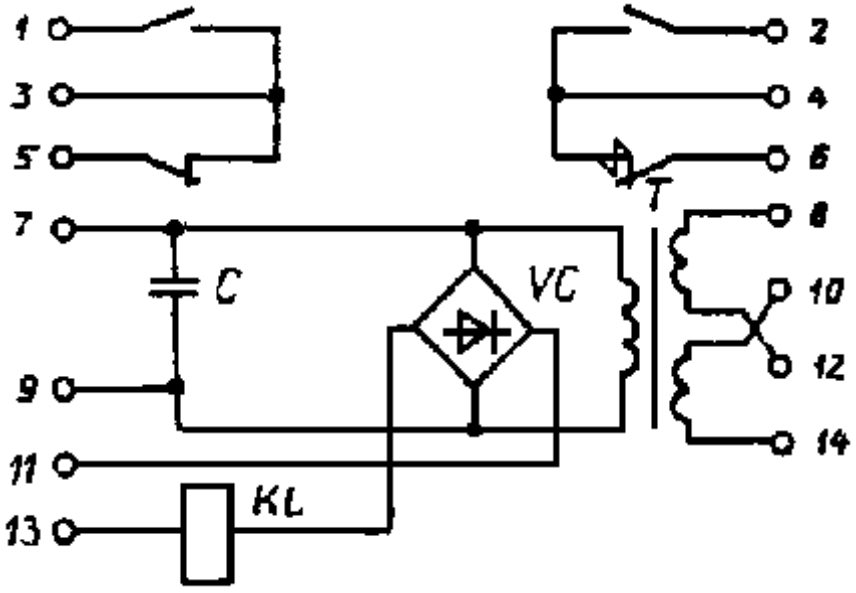


Рис. 13.1. Схема внутренних соединений реле времени РВМ-12

Промежуточное реле типа РП-341. Реле применяется в схемах с дешунтированием катушки отключения. Схема внутренних соединений реле приведена на рис. 13.2.



Файл скачан с www.turbinist.ru

Рис. 13.2 Схема внутренних соединений промежуточного реле РП-341

Первичные обмотки промежуточного насыщающегося трансформатора Т включаются во вторичные цепи трансформаторов тока. Ко вторичной обмотке трансформатора Т через выпрямительный мост подключено реле постоянного тока KL клапанного типа. Благодаря наличию насыщающего трансформатора ток во вторичной обмотке даже при очень больших кратностях тока в первичной обмотке не превышает некоторого заданного значения. Значение тока определяется допустимым током для выпрямителей и контактов управляющих реле.

При последовательном соединении первичных обмоток промежуточного трансформатора реле срабатывает при токе 2,5 А, а при параллельном соединении обмоток - при токе 5 А. При токе, равном удвоенному току срабатывания реле, потребляемая мощность составляет 6 В·А. Реле РП-341 допускает длительное протекание по первичной обмотке при параллельно соединенных секциях насыщающегося трансформатора тока 10 А и в течение 4 с - тока 150 А.

Усиленные переключающие контакты способны шунтировать и дешунтировать отключающие катушки выключателей при переменном токе до 150 А, если управляемая цепь питается от трансформатора тока и ее полное сопротивление при токе 3,5 А не более 4,5 Ом.

Реле тока типа РТ-85. Реле является комбинированным и состоит из двух элементов - электромагнитного и индукционного. Электромагнитный элемент представляет собой реле тока мгновенного действия. Индукционный элемент - реле тока с зависимой от значения тока выдержкой времени - используется для выполнения максимальной токовой защиты с выдержкой времени.

Реле РТ-85/1 имеет номинальный ток 10 А и регулировку тока срабатывания индукционного элемента от 4 до 10 А, реле РТ-85/2 - номинальный ток 5 А и регулировку тока срабатывания индукционного элемента от 2 до 5 А. Время срабатывания в независимой части характеристики реле регулируется в пределах от 0,5 до 4 с.

Переключающий контакт способен шунтировать и дешунтировать цепь с сопротивлением 4,5 Ом при токах до 150 А. Особенностью работы контактов при дешунтировании является то, что в процессе переключений цепь замкнута на тот или иной резистор. Это необходимо в связи с возможностью появления в разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока высокого напряжения.

Указательные реле типа РУ-21 выпускаются для работы на постоянном токе, но могут быть использованы и на переменном оперативном токе.

13.3. Источники выпрямленного оперативного тока

Комплектные устройства питания электромагнитов включения выключателей типа УКП. Комплектные устройства питания УКП-220 и УКП-380 (в дальнейшем - устройства питания) предназначены для питания электромагнитов включения выключателей с током потребления до 320 А. В режиме включения выключателей на КЗ и исчезновения при этом переменного напряжения устройства питания обеспечивают включение выключателей с током потребления электромагнитов до 150 А.

Устройства питания состоят из двух основных сборочных единиц:

устройства УКП1 - устройства выпрямителя с распредустройством (шкаф № 1);

устройства УКП2 - устройства накопителя (шкаф № 2).

Устройство УКПМ состоит из УКП1 и УКП2, вмонтированных в один шкаф.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Устройства питания обеспечивают включение одного маломасляного выключателя с электромагнитным приводом на номинальное напряжение 6-35 кВ в режиме снижения выпрямленного оперативного напряжения до 50 % номинального и менее вследствие включения на КЗ.

Устройства имеют: контроль выпрямленного напряжения; контроль исправности узла накопителя; контроль изоляции выпрямленного напряжения; защиту от токов КЗ на стороне выпрямленного напряжения, внутренних замыканий и токов перегрузки.

В табл. 13.3 приведены основные технические данные устройств типа УКП.

Таблица 13.3. Основные технические данные устройств типа УКП

Наименование параметра	Норма для типоисполнения	
	УКП-220 УКПМ-220	УКП-380 УКПМ-380
Напряжение питающей сети трехфазное, В	220	380, 400, 415, 440 с нулевым проводом
Выпрямленное напряжение в режиме ХХ, В	297	257, 270, 280, 297
Номинальное выпрямленное напряжение в режиме нагрузки, В	230	230
Допустимые отклонения выпрямленного напряжения и напряжения питающей сети, %	+ 10; - 15	+ 10; - 15
Максимальный выпрямленный ток нагрузки с выходом через накопитель, А	150	150
Максимальный выпрямленный ток нагрузки с выходом без накопителя, А	320	320
Пределы величин нагрузки на выходах:		
“150 А”, А	55-150	55-150
“320 А”, А	150-320	150-320
Характер нагрузки	Импульсный	Импульсный
Длительность импульса нагрузки, с	1	1
Минимально допустимое время между импульсами, с	0,5	0,5
Количество импульсов в цикле, не более, при токе:		
320 А	4	4
150 А	5	5

Файл скачан с www.turbinist.ru

100 А	10	10
Время между циклами, мин	10	10

13.4. Источники переменного оперативного тока

Трансформаторы тока и напряжения. В схемах релейной защиты на переменном оперативном токе трансформаторы тока и напряжения служат источниками питания оперативных цепей.

Особенностью схем являются относительно небольшая длительная нагрузка на источники переменного тока и напряжения и резкое увеличение нагрузки при работе защиты или автоматики, особенно когда подключаются электромагниты отключения и включения.

При выполнении схемы и ее наладке необходимо знать основные параметры трансформаторов тока - класс точности, номинальные вторичные нагрузки, кратность насыщения сердечников, максимальную кратность вторичного тока, кривые 10 %-ной погрешности. Для трансформаторов напряжения необходимо знать класс точности и максимальную мощность, отдаваемую трансформаторами в этом классе.

Максимальные погрешности трансформаторов напряжения целесообразно принять такими же, как и у трансформаторов тока, а именно - 10 % по коэффициенту трансформации и 7°по углу [2].

Блоки питания с помощью промежуточных трансформаторов и выпрямителей преобразуют переменное напряжение или ток, получаемые от измерительных трансформаторов или трансформаторов собственных нужд, в выпрямленное оперативное напряжение 110 или 220 В.

К блокам питания напряжения (БПН), включаемым в цепи трансформаторов напряжения или собственных нужд, относятся блоки питания типа БПН-11/1, БПН-11/2, БПН-1002, БПЗ-401. К блокам питания тока (БПТ), включаемым в цепи трансформаторов тока, относятся блоки питания БПТ-11, БПТ-1002, БПЗ-402.

Блоки питания БПЗ-401 и БПЗ-402 предназначены также для заряда блоков конденсаторов, энергия которых используется для приведения в действие электромагнитов отключения (включения) коммутационных аппаратов. На рис. 13.3 приведены принципиальные схемы блоков питания напряжения БПН-11, БПН-1002 и токовых типов БПТ-11, БПТ-1002. На рис. 13.4 приведены принципиальные схемы блоков питания и заряда БПЗ-401 и БПЗ-402.

Файл скачан с www.turbinist.ru

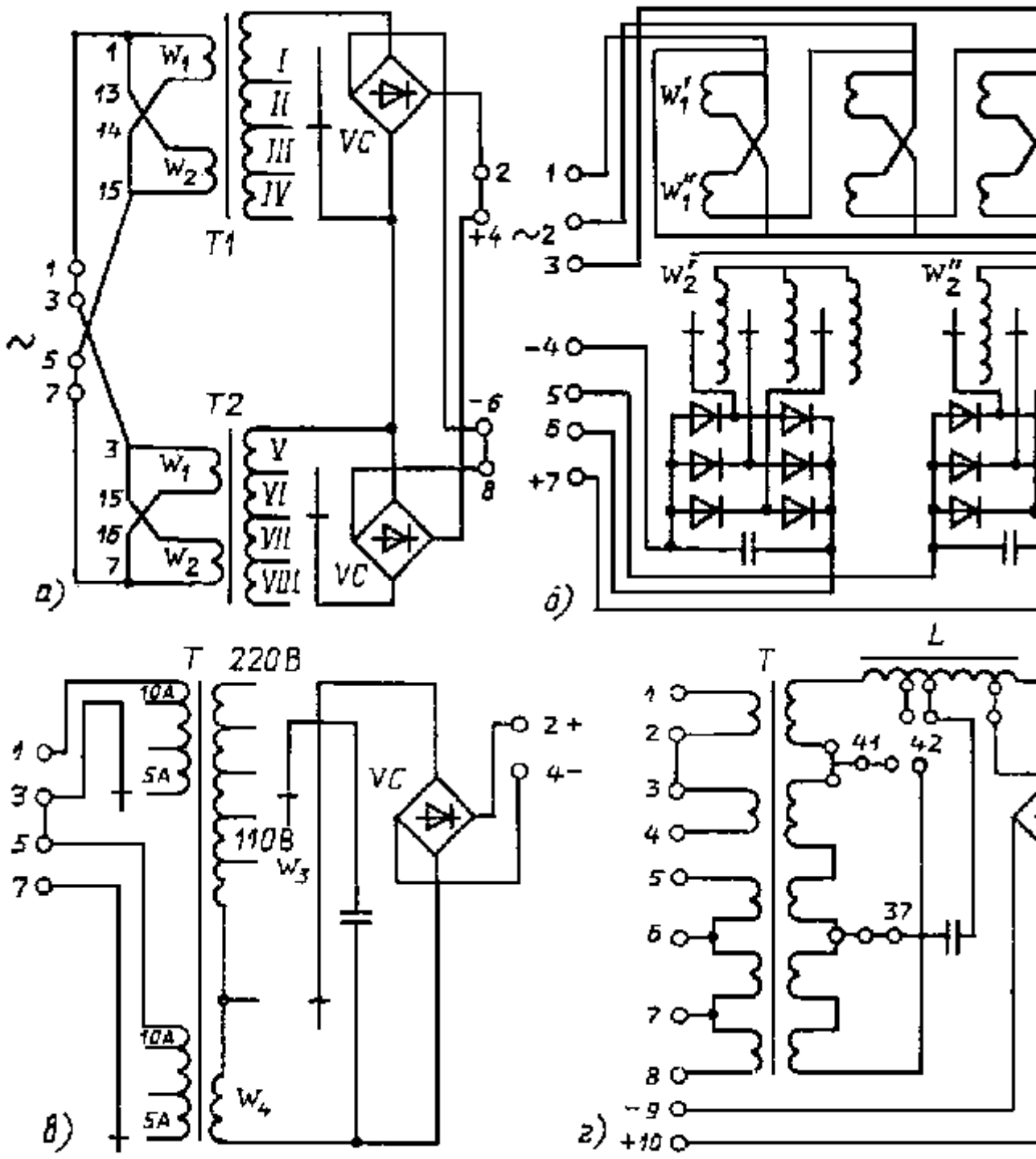


Рис. 13.3. Схема электрическая принципиальная блоков питания:

а - блока питания БПН-11; б - блока питания БПН-1002; в - блока питания БПТ-11; г - блока питания БПТ-1002

Файл скачан с www.turbinist.ru

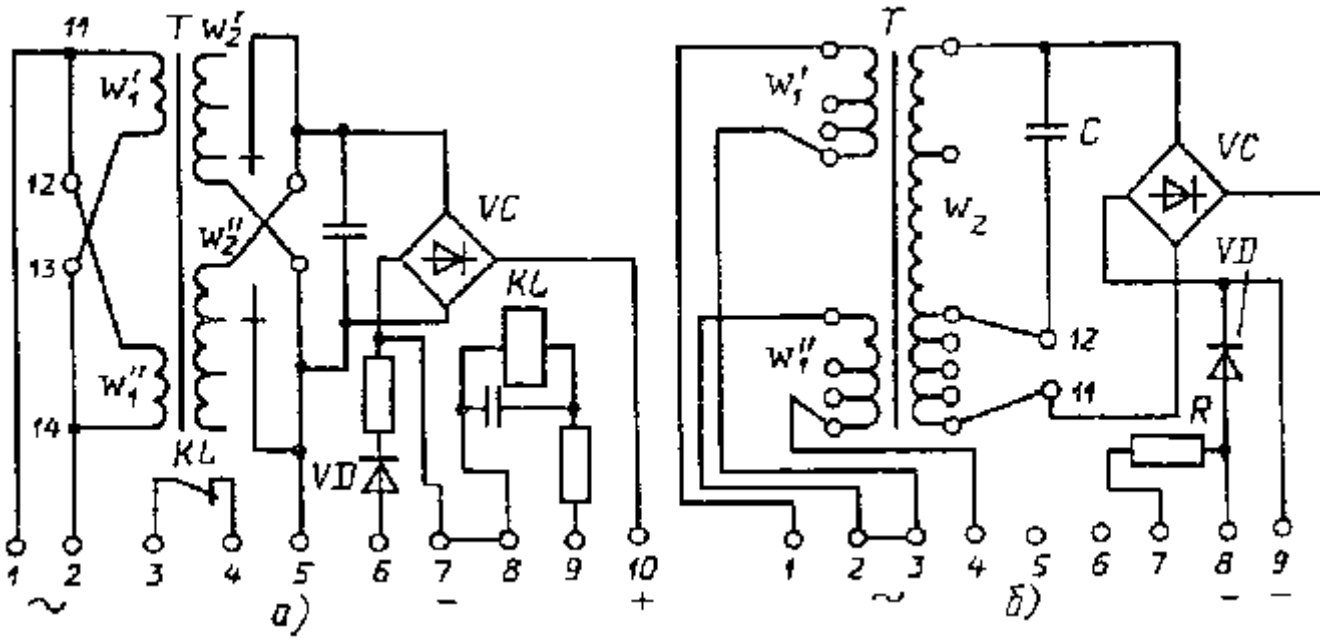


Рис. 13.4. Схема электрическая принципиальная блоков питания и заряда:

а - блока БПЗ-401; б - БПЗ-402

Технические данные приведены в табл. 13.4, 13.5, 13.6.

Таблица 13.4. Технические данные блоков питания БПН и БПТ

Наименование параметров	Значения параметров для блоков питания		
	БПН-11/1	БПН-11/2	БПТ-11
Уставки по току наступления феррорезонанса, А:			
при включении одной первичной обмотки	-	-	5; 7,5; 10
при последовательном включении первичных обмоток	-	-	2,5; 3,75; 5
Номинальное входное напряжение, В	100, 110, 127, 220	100, 110, 127, 220	-
Номинальное выходное напряжение, В	110	24	220, 110, 24
Потребляемая мощность при отсутствии нагрузки на выходе, В·А, не более:			
при входном токе 9,5 А на уставке “5” и последовательном соединении первичных обмоток	-	-	95

Файл скачан с www.turbinist.ru

при номинальных входных напряжениях 100, 110, 220 В	9	9	-
при номинальном входном напряжении 127 В	12	12	-

Таблица 13.5. Выходные напряжения блока БПТ-1002

Сопротивление нагрузки, Ом	Уставка 110 В	Уставка 220 В
Бесконечность	Не более 130	-
10	Не менее 90	-
Бесконечность	-	Не более 260
40	-	Не менее 180

Таблица 13.6. Технические данные блоков питания и заряда БПЗ-401 и БПЗ-402

Наименование параметров	БПЗ-401	БПЗ-402
Уставка по току наступления феррорезонанса, А	-	4,65; 6,0; 8,5; 9,3; 12,0; 17
Номинальное входное напряжение, В	100, 110, 127, 220	-
Номинальное выходное напряжение, В	110, 220	110, 220
Номинальное напряжение заряда, В	400 ± 5%	400 ± 5%
Время заряда конденсаторов емкостью 200 мкФ до напряжения 0,8, установившегося при номинальном входном напряжении для блоков БПЗ-401, при входном токе 3 $I_{уст}$ для блоков БПЗ-402, мс, не более	70	70
Длительно допустимое сопротивление нагрузки (режим блока питания), Ом:		
уставка по выходному напряжению 110 В	150	150
уставка по выходному напряжению 220 В	600	520
Номинальное допустимое сопротивление нагрузки, Ом:		
уставка по выходному напряжению 110 В	50	50
уставка по выходному напряжению 220 В	200	200
Максимальная емкость заряжаемых конденсаторов, мкФ	2000	2000

Файл скачан с www.turbinist.ru

Технические данные блока питания БПН-1002.

1) Номинальное входное напряжение блока 100, 110, 127, 220, 380 В. Блок может включаться на напряжение 115, 230, 400, 440 В.

2) Блок питания в длительном режиме работы допускает включение на напряжение, превышающее на 10 %, указанное в п. 1, при этом ток нагрузки не должен превышать:

для уставки выходного напряжения 110 В - 6,4 А;

для уставки выходного напряжения 220 В - 3,2 А.

3) Сопротивление изоляции между токоведущими электрически не связанными цепями, а также между ними и корпусом блока составляет не менее 50 МОм.

Технические данные блока питания БПТ-1002.

1) При плавном увеличении тока в первичной обмотке и при отсутствии нагрузки на выходе феррорезонанс наступает при намагничивающей силе в первичной обмотке трансформатора блока, равной 840 ± 100 А·вит.

2) Выходное напряжение при протекании тока 10 А по всем секциям первичной обмотки трансформатора блока указано в табл. 13.5.

3) Блок выдерживает на входе на уставке по току феррорезонанса “5 А” в течение 5 с ток 50 А, в течение 1 с - ток 120 А при нагрузке:

для уставки номинального выходного напряжения 110 В - 10 Ом;

для уставки номинального выходного напряжения 220 В - 40 Ом.

4) Длительно допустимый ток нагрузки блока:

для уставки выходного напряжения 110 В - 7 А;

для уставки выходного напряжения 220 В - 3,5 А.

5) Сопротивление изоляции между токоведущими электрически не связанными цепями, а также между ними и корпусом блока составляет не менее 50 МОм.

Блоки питания и заряда БПЗ-401, БПЗ-402 предназначены для питания выпрямленным током схем (устройств) релейной защиты и автоматики, выполненных на номинальное напряжение 110 и 220 В при суммарной потребляемой мощности 100 Вт в длительном режиме и 200 Вт в кратковременном режиме или для заряда блоков конденсаторов суммарной емкостью до 2000 мкФ, энергия которых используется для приведения в действие электромагнитов отключения (включения) коммутационных аппаратов.

Сопротивление изоляции между токоведущими электрически не связанными цепями, а также между ними и корпусом блока составляет не менее 50 МОм.

13.5. Схемы устройств релейной защиты и автоматики на переменном оперативном токе

Файл скачан с www.turbinist.ru

В качестве примера приведено несколько типовых схем устройств РЗА на переменном оперативном токе, применяемых для трансформаторных подстанций типа КТПБ 110/6 - 10 кВ и 110/35/6 - 10 кВ.

Схема организации переменного оперативного тока, цепей управления, сигнализации и телемеханики. Питание цепей осуществляется от трансформаторов собственных нужд. Шинки 1EC, 2EC, 1EH, 2EH образуются от шинок обеспеченного питания EY.N, EY.O, питающихся от стабилизатора напряжения TSV1 (рис. 13.5). Схемы выполняются с автоматическим включением резервного источника питания (контакторы KL1, KL2). Питание оперативным током от трансформаторов напряжения применяется для цепей АВР.

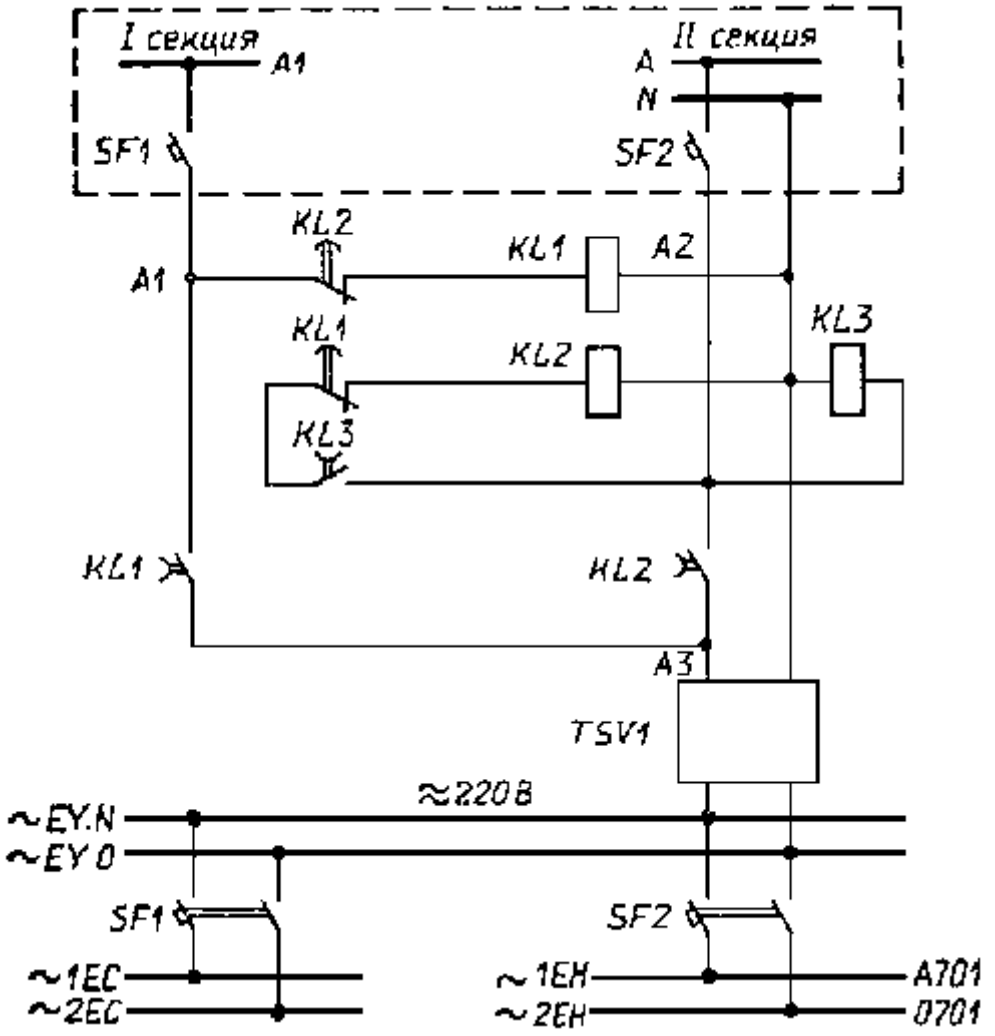


Рис. 13.5. Схема организации переменного оперативного тока

Цепи управления, сигнализации, телемеханики. На рис. 13.6 представлена схема управления выключателем. Шинки управления запитываются через автоматический выключатель SF типа АП-50/2 МТ с $I_{кор} = 3,5\ I_{ном}$. Включение выключателя может осуществляться как непосредственно ключом управления, так и по цепям АПВ и телеуправления, для чего предусмотрен переключатель положения типа ПКЧЗ-12Е3035. Отключение также может осуществляться по цепям телеотключения, например при АЧР.

Файл скачан с www.turbinist.ru

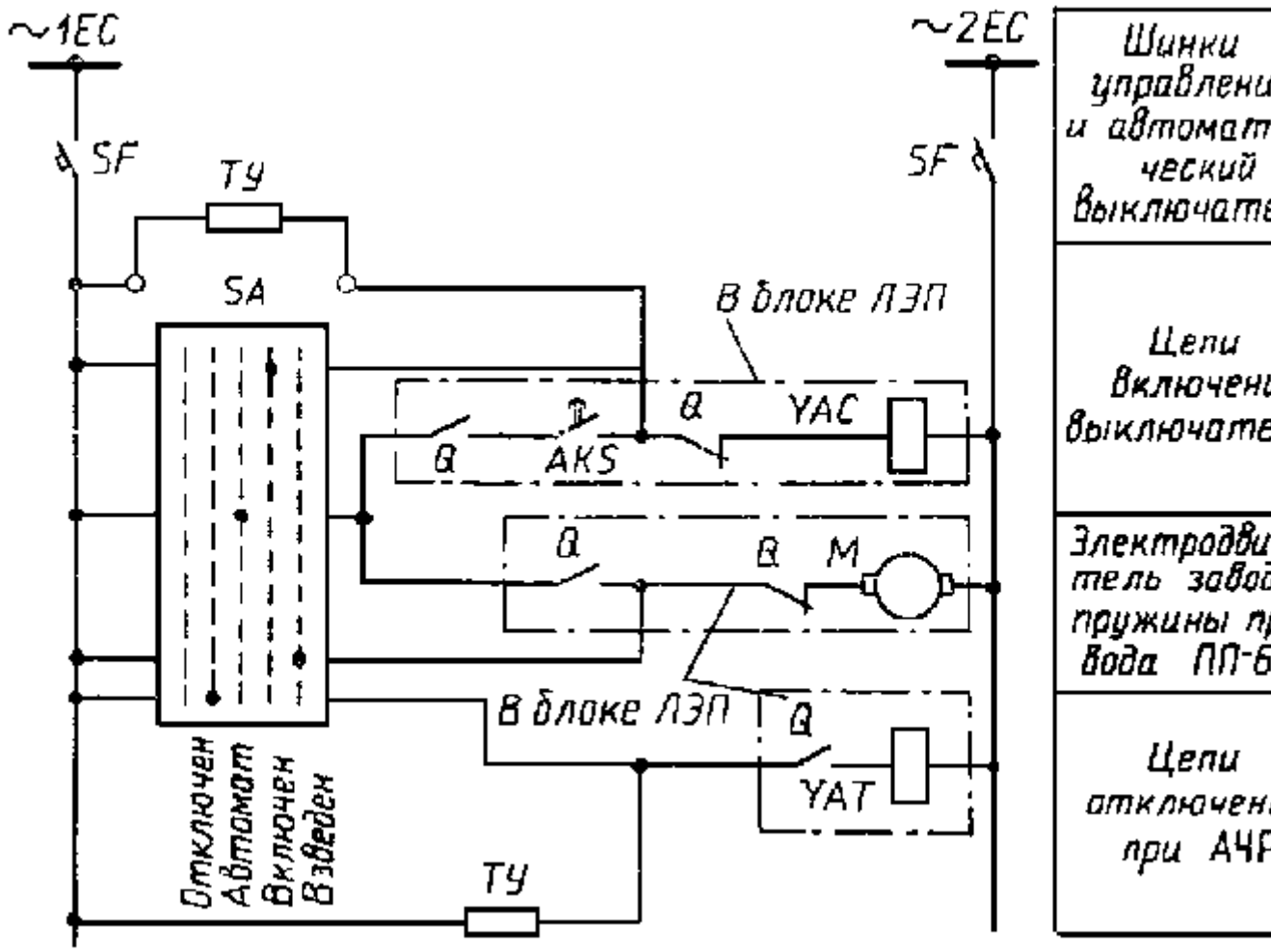


Рис. 13.6. Принципиальная схема управления выключателем

Максимальная защита. Поясняющая схема и цепи защиты даны на рис. 13.7. В схеме используются встроенные реле прямого действия РТМ1, РТМ2, промежуточные реле KL1, KL2 типа РП-341, реле времени КТ типа РВМ-12. Защита выполнена на переменном оперативном токе с дешунтированием катушек отключения. Амперметр РА служит для измерения тока линии.

Файл скачан с www.turbinist.ru

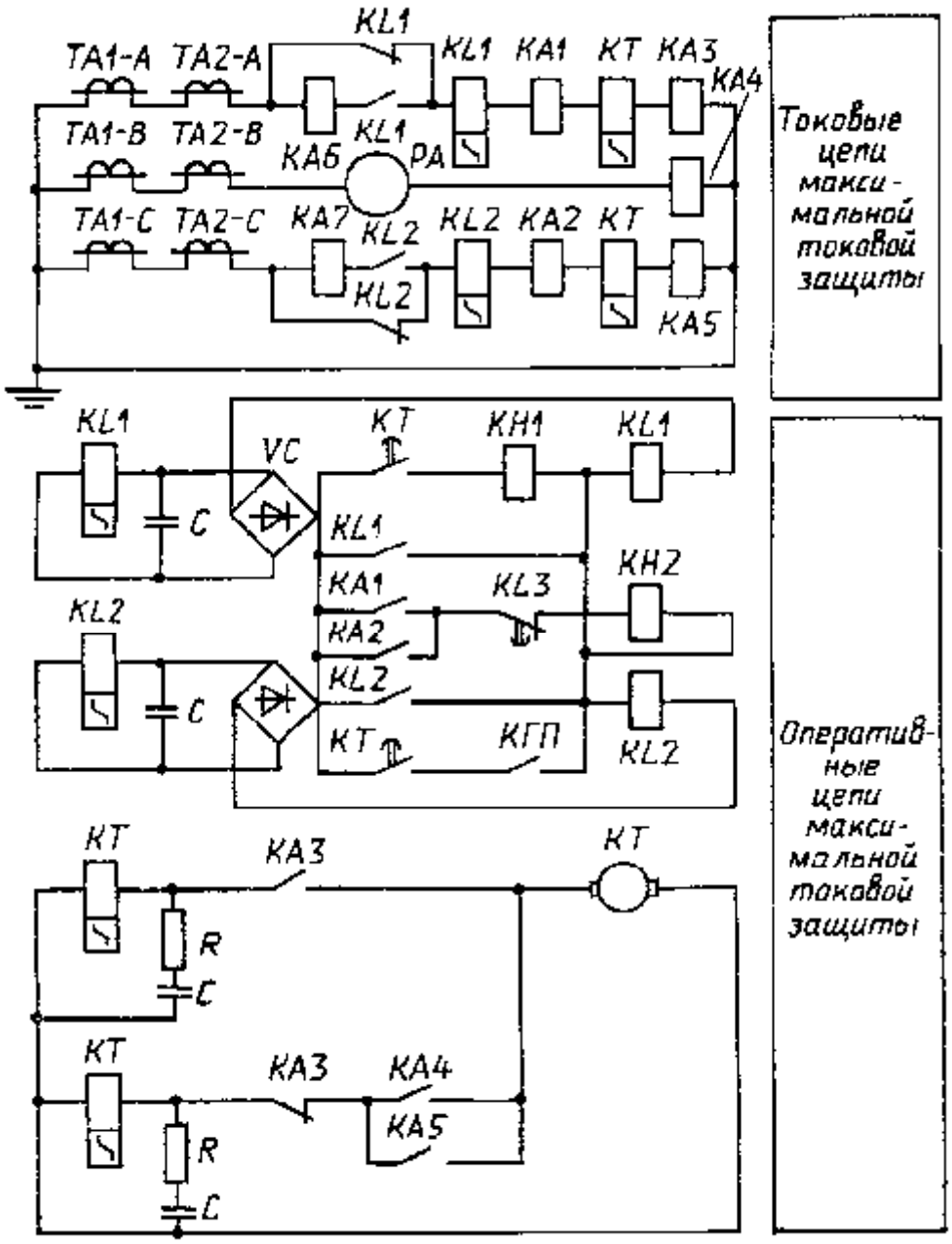


Рис. 13.7. Принципиальная схема токовых цепей и оперативных цепей максимальной токовой защиты линии 35 кВ

Защиты силового трансформатора 110/6-10 кВ. На рис. 13.8 представлена поясняющая схема защиты, трансформатора, а на рис. 13.9 - токовые цепи и цепи оперативного тока дифференциальной токовой защиты, максимальной токовой защиты, защиты от перегрузки, реле обдува трансформатора и реле контроля тока короткозамыкателя. В схеме используются реле типа ДЗТ-11 (KAW1, KAW2), РТ 40/Р5 (KSA1), РТ 40 (КА1-КА4), реле промежуточное РП-321 (KLF1, KLF2), реле времени РВМ 12 (КТ1).

Файл скачан с www.turbinist.ru

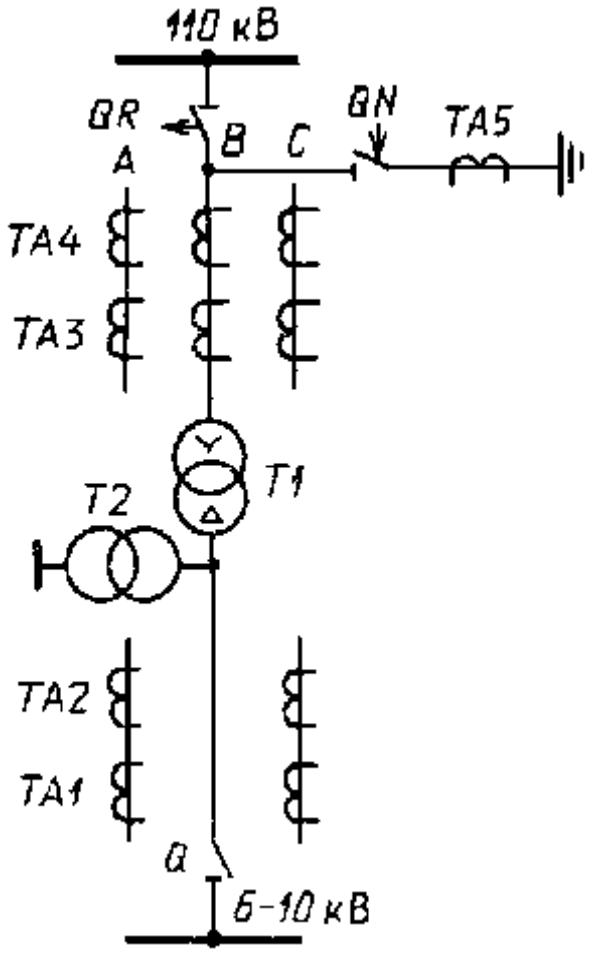
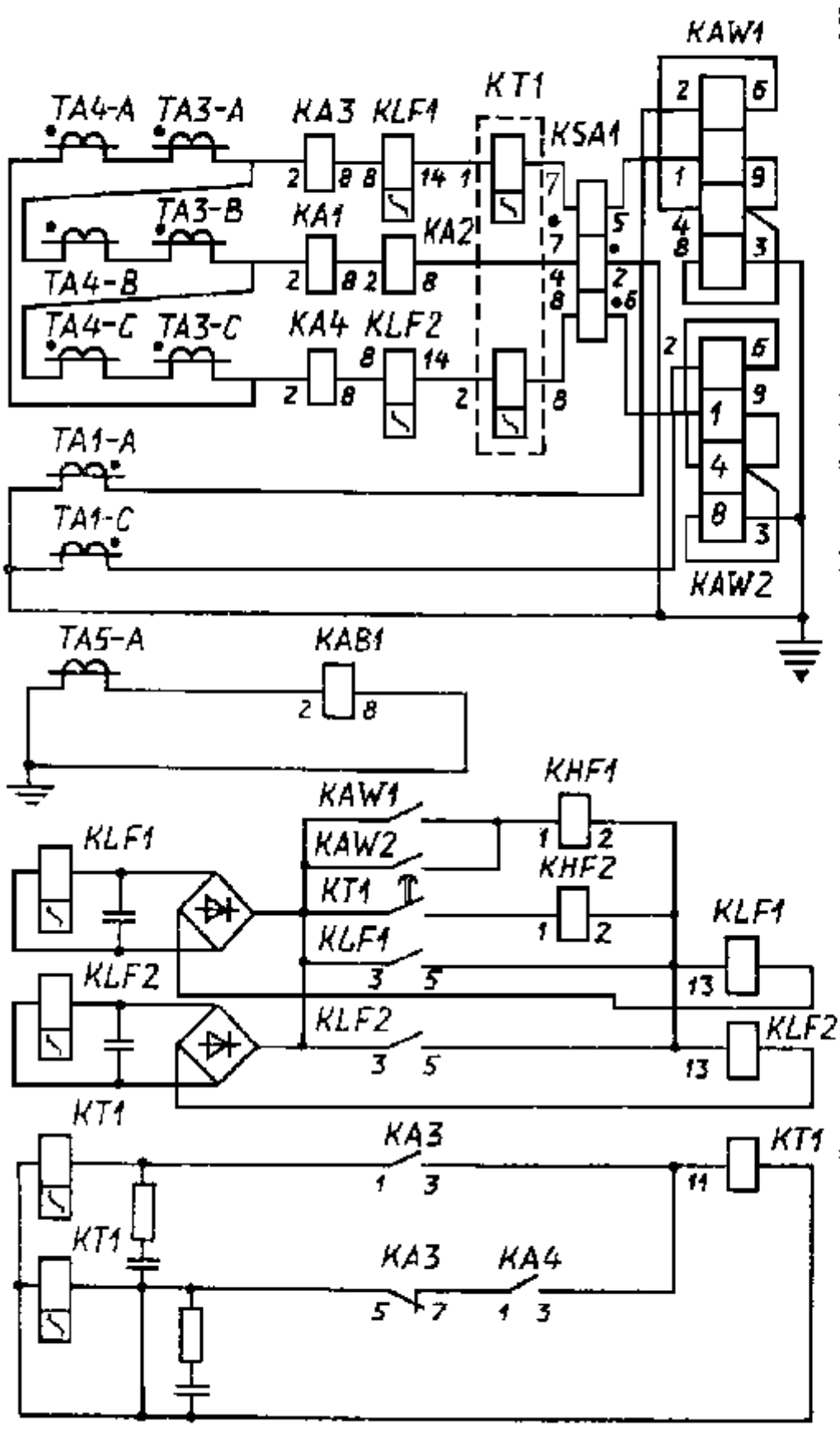


Рис. 13.8. Поясняющая схема защиты силового трансформатора 110/6 - 10 кВ

Файл скачан с www.turbinist.ru



Дифференциальная токовая защита, максимальная токовая защита от перегрузки, реле обдувки, реле контроля тока в линии

Реле контроля тока короткозамыкателя

Выходные цепи дифференциальной максимальной токовой защиты и защиты от дуговых замыканий на стороне 110 кВ

Цепи оперативного тока

Файл скачан с www.turbinist.ru

Рис. 13.9. Схема токовых цепей и цепей оперативного тока дифференциальной защиты, максимальной защиты, защиты от перегрузки силового трансформатора 110/6 - 10 кВ

На рис. 13.10 приведена схема цепей оперативного тока газовой защиты трансформатора (контакты KSG1, KSG2) и цепи отключения отделителя и включения короткозамыкателя с использованием блока питания и заряда конденсаторов типа БПЗ-401 (UGC1) на 220 В, подключаемого к шинкам EY.N, EY.O блоков конденсаторов БК-402 на 80 мкФ и 400 В и БК-401 на 40 мкФ и 400 В.

Файл скачан с www.turbinist.ru

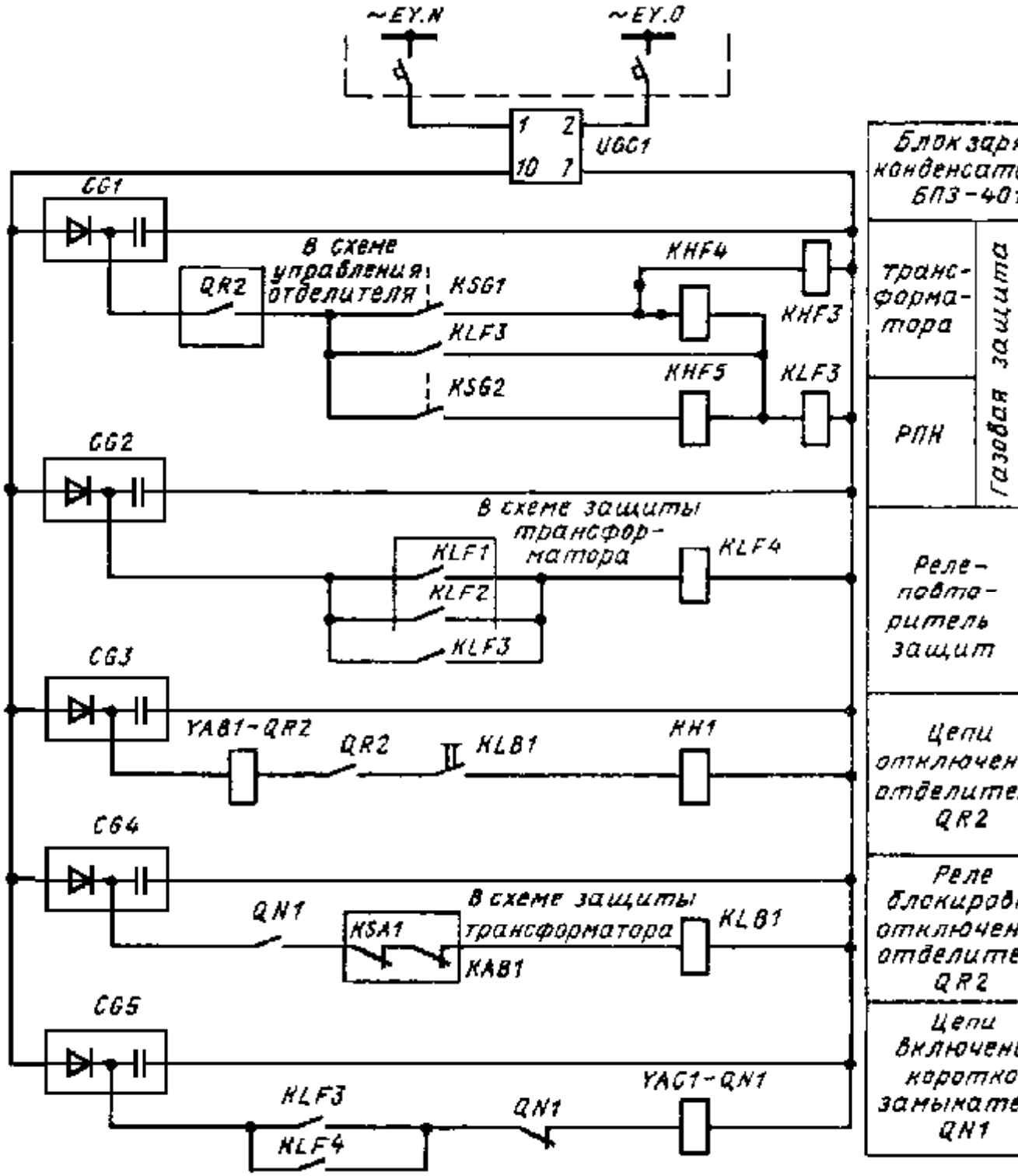


Рис. 13.10. Схема цепей оперативного тока газовой защиты силового трансформатора 110/6 - 10 кВ и цепи отключения отделителя и включения короткозамыкателя

Включение короткозамыкателя производится от действия защит (контакты KLF3, KLF4) на электромагнит включения короткозамыкателя YAC1-QN1 220 В. Отключение отделителя производится контактом реле блокировки KLB1 с контролем отсутствия тока линии (KSA1) и тока через короткозамыкатель (KAB1).

Файл скачан с www.turbinist.ru

На схеме показаны цепи заряда и разряда блоков конденсаторов, лампы и сопротивления разряда блоков конденсаторов, применяемых в реальной схеме.

Питание газовой защиты по рассмотренной схеме допустимо только при наличии дифференциальной защиты трансформатора.

13.6. Особенности наладки устройств РЗА на переменном оперативном токе

Проверка реле прямого действия при новом включении выполняется в следующем объеме:

внешний осмотр;

проверка механической части реле;

проверка отключающего механизма привода и совместная регулировка его с реле;

проверка схемы включения реле;

проверка сопротивления изоляции и испытание повышенным напряжением;

проверка электрических характеристик реле.

При внешнем осмотре проверяется состояние обмотки реле и ее выводов. Для проверки механической части реле проверяется исправность всех деталей. При необходимости реле разбирается. При обнаружении ржавчины на деталях реле, погнутых и помятых гильз, погнутых бойков, винтов, шпилек, разбитых деталей из пластмассы поврежденные детали должны заменяться исправными. При сборке реле не допускается применение каких-либо видов смазки. Проверенные реле устанавливаются в привод, и проверяется отсутствие перекосов и свободное движение всех подвижных частей. После этого производится проверка отключающего импульса механизма привода и совместная регулировка его с реле.

Согласование хода бойка реле и электромагнитов с отключающим механизмом приводов производится для каждого реле и электромагнита, установленного в приводе. При этом должны выполняться следующие условия:

для реле РТМ и электромагнитов отключения касание бойком лапки отключающей планки должно происходить как можно позже, когда их сердечники имеют наибольшее тяговое усилие. Расстояние от бойка до лапки отключающей планки должно быть не менее 6 мм;

для всех реле и электромагнитов запас хода бойка после расцепления отключающего механизма должен быть около 2 мм.

Проверка сопротивления изоляции и испытание ее повышенным напряжением выполняются в полной схеме. Поэтому предварительно должны быть собраны цепи переменного тока и напряжения, цепи управления и проверена правильность соединений, соответствие их принципиальным и монтажным схемам и затяжка всех контактных соединений.

Сопротивление изоляции измеряется мегомметром на 1000 В относительно корпуса и между собой. Сопротивление изоляции для каждого присоединения должно быть не ниже 1 МОм. При удовлетворительных результатах производится испытание изоляции всех цепей относительно корпуса напряжением 1 кВ переменного тока в течение 1 мин.

Проверка электрических характеристик реле и электромагнитов выполняется в следующем объеме.

Файл скачан с www.turbinist.ru

У реле РТМ и токовых электромагнитов отключения проверяется ток срабатывания на всех уставках или отпайках; настраивается заданная уставка тока срабатывания, измеряется полное время срабатывания при кратности тока в реле 1 и 1,5.

У реле РТВ проверяется ток срабатывания на всех уставках или отпайках, устанавливается заданная уставка тока срабатывания и выдержка времени в независимой части характеристики или при заданном токе, снимается зависимость $t_{cp} = f(I_{cp})$ на рабочей уставке, измеряется коэффициент возврата реле в зависимой и независимой частях характеристики.

У реле минимального напряжения проверяется напряжение срабатывания и возврата реле, устанавливается заданная выдержка времени, измеряется ток в реле при минимальном напряжении.

У блокирующего реле отделителя проверяется ток срабатывания реле, проверяется реле на вибрацию до максимального значения тока КЗ при включенном короткозамыкателе.

У электромагнитов отключения и включения проверяется напряжение срабатывания и возврата, измеряется ток электромагнита при номинальном напряжении.

Схемы регулирования тока. При настройке реле типов РТМ и РТВ учитывается погрешность трансформаторов тока. Настройку уставок реле независимо от результатов расчетов ведут так, чтобы автоматически учитывались погрешности трансформаторов тока. В большей мере это относится к реле типа РТВ, имеющим значительное сопротивление обмоток и зависимую от тока выдержку времени. Настройка реле от постороннего источника без учета погрешностей трансформаторов тока может привести к тому, что при действительном КЗ выдержка времени его значительно увеличится по сравнению с расчетной. Схема проверки реле типа РТВ приведена на рис. 13.11.

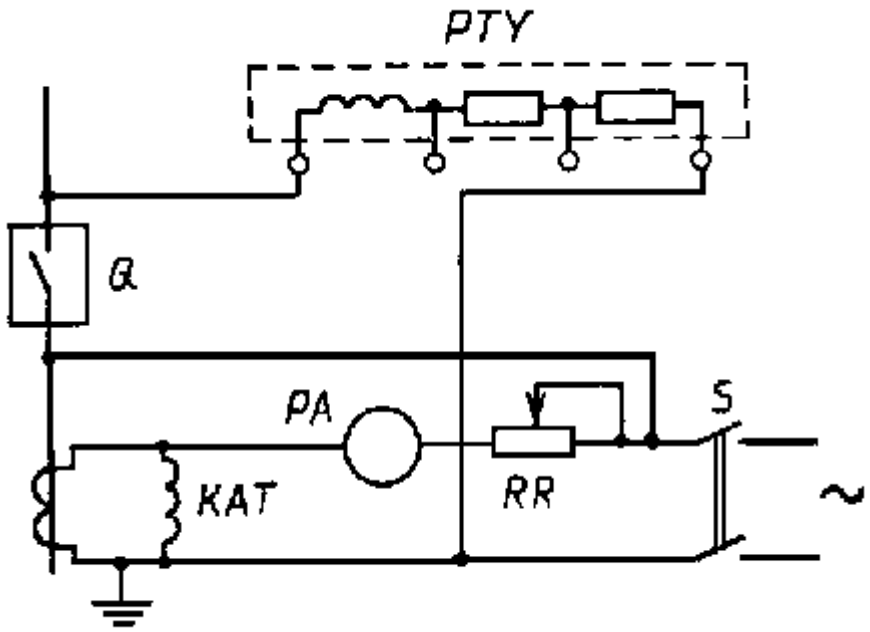


Рис. 13.11. Схема проверки РТВ

В этой схеме на обмотку реле КАТ, включенную параллельно вторичной обмотке трансформатора тока, подается ток. При таком включении сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока включено последовательно с сопротивлением ветви намагничивания.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Сопротивление вторичной обмотки применяемых трансформаторов тока (десятые доли ома) значительно меньше сопротивления обмотки реле (2-5 Ом) и ветви намагничивания (десятки ом), поэтому им можно пренебречь. Проверка по схеме рис. 13.11 дает очень небольшую ошибку. По этой же схеме необходимо проверять реле типа РТМ [22].

Напряжение срабатывания электромагнитов включения и отключения проверяется при действии их на привод. Проверка электромагнитов постоянного и переменного тока выполняется по схеме рис. 13.12.

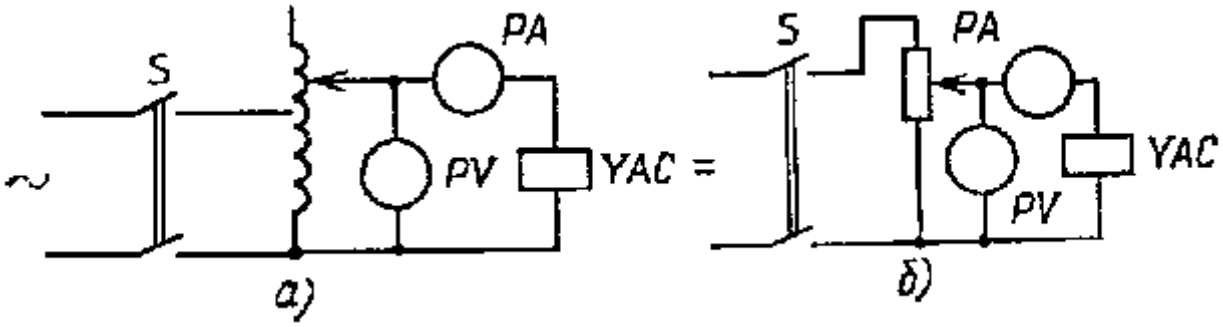


Рис. 13.12. Схема проверки электромагнитов включения и отключения:

а - электромагнитов переменного тока; б - электромагнитов постоянного тока

Напряжение срабатывания электромагнитов включения не должно превышать 0,8 номинального напряжения. Напряжение срабатывания электромагнитов отключения не должно превышать 0,65 номинального напряжения. Напряжение возврата электромагнитов не регламентируется, но они должны четко возвращаться в исходное положение при снижении напряжения до нуля.

Установка заданной выдержки времени и снятие характеристик для реле РТВ производится после регулировки заданной уставки по току срабатывания при определенном значении тока в независимой части характеристики.

Предварительно устанавливается заданный ток или ток, соответствующий независимой части характеристики (примерно четырехкратный ток срабатывания). Установленный ток подают в обмотку реле толчком и измеряют время срабатывания. Снимается зависимость времени срабатывания от тока в реле $t_{ср}=f(I_р)$ на рабочей уставке. Рекомендуется время определять при токах, равных 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4 тока срабатывания.

Разброс времени срабатывания в независимой части характеристики для реле разных заводов не должен превышать 0,2-0,3 с. Разброс следует учитывать при согласовании со смежными защитами.

Производится настройка заданных уставок реле РТВ по схеме рис. 13.13, и после этого коэффициент возврата измеряется как в независимой, так и в зависимой части характеристики.

Файл скачан с www.turbinist.ru

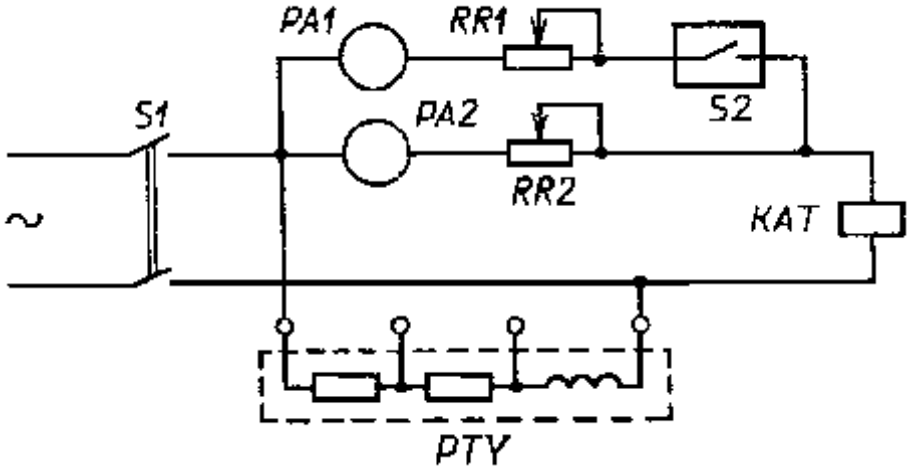


Рис. 13.13. Схема проверки коэффициента возврата реле РТВ

При включенном выключателе S1 и отключенном S2 реостатом RR2 по амперметру PA2 устанавливается предполагаемый ток возврата реле КАТ, равный 0,8-0,7 тока срабатывания. Затем включается выключатель S2 и реостатом RR1 по амперметру PA1 устанавливается примерно 2-3-кратный ток срабатывания. Выключатель S1 отключается, секундомер PTY устанавливается на нуль и выключатель S1 снова включается. По секундомеру отсчитывается время на 0,5-0,7 с меньше выдержки времени проверяемого реле в независимой части характеристики, и в этот момент выключатель S2 отключается. Таким образом имитируется сквозное КЗ для данного реле и отключение его своей защитой.

Опытным путем подбирается максимальное значение тока в цепи PA2, RR2, при котором реле тока КАТ после отключения выключателя S2 возвращается в начальное положение. Этот ток и будет током возврата при работе реле в независимой части характеристики.

Аналогично измеряется ток возврата реле и при работе реле в зависимой части характеристики. В этом случае суммарный ток в цепи реле устанавливается равным 1,2-1,5 тока срабатывания.

Необходимо отметить, что при настройке реле типа РТВ измеряется сумма времени срабатывания реле и времени отключения выключателя до начала размыкания контактов.

Наладка промежуточных реле типа РП-341 выполняется в том же объеме, что и наладка промежуточных реле других типов с некоторыми особенностями. При наладке механической части реле РП-341 необходимо обратить особое внимание на регулирование силовых контактов, обеспечивающих безразрывное переключение цепей трансформаторов тока в схемах с дешунтированием катушек отключения приводов выключателей. Как уже отмечалось, усиленные контакты этих реле способны шунтировать и дешунтировать цепь при вторичных токах до 150 А. Контакты нормального исполнения реле РП-341 способны размыкать цепь переменного тока мощностью 450 В·А при токе до 2 А и напряжении до 220 В и замыкать цепь мощностью 1000 В·А при токе до 15 А и напряжении до 220 В.

Проверяется ток срабатывания, возврата реле и ток надежной работы. При проверке ток регулируется реостатом. Этим обеспечивается синусоидальная форма, необходимая для правильной настройки реле с насыщающимися трансформаторами. Ток подается на зажимы реле 8-14.

Для оценки состояния выпрямительного моста в реле снимается характеристика зависимости выпрямленного напряжения на зажимах реле 11-13 от тока в первичной обмотке насыщающегося трансформатора до вторичного расчетного тока КЗ.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Наладка реле времени типа РВ-200. Реле предназначено для работы на переменном оперативном токе для создания регулируемой выдержки времени. Пуск реле РВ-217 - РВ-248 происходит при подаче напряжения на его обмотку.

Для реле РВ-215 - РВ-245, пуск которых происходит при снятии напряжения с обмотки, привод механизма дополнен вспомогательным рычагом и заводной пружиной. Схемы внутренних соединений реле времени РВ-218, РВ-248, РВ-215 К, РВ-245 К приведены на рис. 13.14.

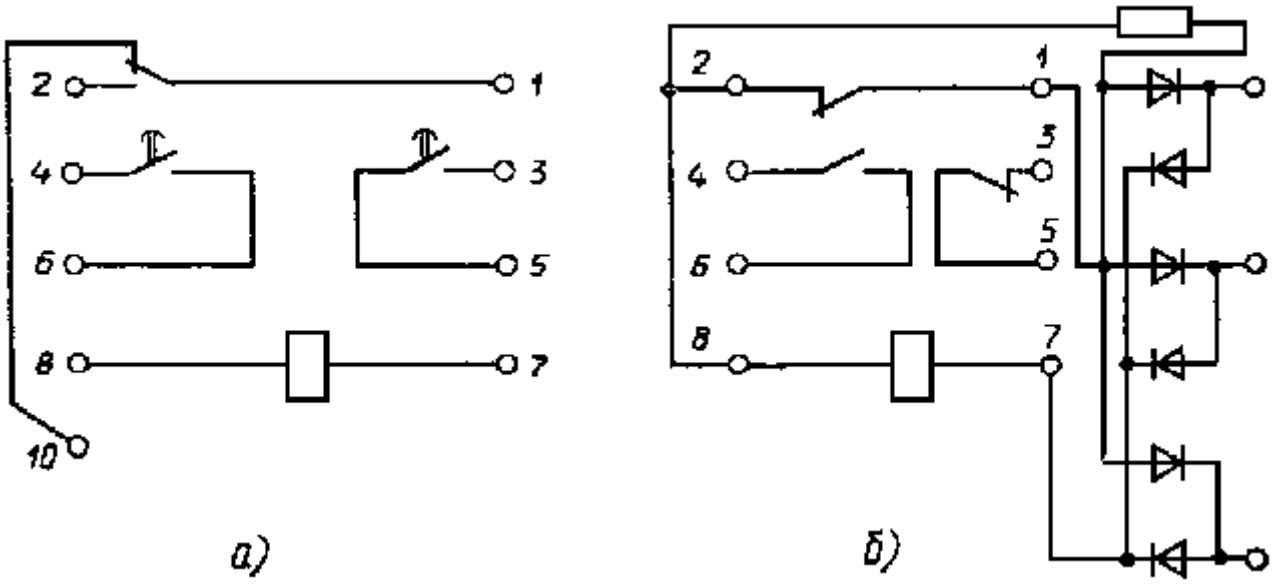


Рис. 13.14. Схема внутренних соединений реле времени:

а - РВ-218, РВ-248; б - РВ-215 К, РВ-245 К

Технические характеристики реле РВ-200 даны в табл. 13.7.

Реле РВ-215 - РВ-245 в комплекте с выпрямительным устройством ВУ-200 работают в трехфазных схемах и обозначаются соответственно РВ-215 К - РВ-245 К.

В объем проверки реле при новом включении входит: проверка механической части и внешний осмотр; проверка состояния изоляции, искрогасительного контура, выпрямительного устройства ВУ-200; измерение сопротивления постоянному току цепи обмотки реле (для термически стойких реле); проверка напряжения срабатывания и возврата, а также времени срабатывания.

Таблица 13.7. Технические характеристики реле времени РВ-200

Тип реле	Диапазон уставок, с	Номинальное напряжение $U_{ном}$, В	Сопротивление обмотки, Ом	Контакты	
				с выдержкой времени	мгновенный

Файл скачан с www.turbinist.ru

РВ-215 РВ-225 РВ-235 РВ-245	0,1-1,3 0,25-3,5 0,5-9,0 1,0-20	100 127 220 380	Не нормируется	Основной и временно замыкающий	Переключающий
РВ-215К РВ-225К РВ-235К РВ-245К	0,1-1,3 0,25-3,5 0,5-9,0 1,0-20	100 220 - -	210 1000 - -	Основной и временно замыкающий	-
РВ-217 РВ-227 РВ-237 РВ-247	0,1-1,3 0,25-3,5 0,5-9 1,0-2,0	100 220 - -	Не нормируется	Основной	Переключающий
РВ-218 РВ-228 РВ-238 РВ-248	0,1-1,3 0,25-3,5 0,5-9,0 1,0-20	- - - -	- - - -	Основной и временно замыкающий	Переключающий
Примечание. Для реле указанных типов при 1,1 $U_{ном}$ термическая стойкость длительная.					

При проверке механической части реле РВ-215 - РВ-245 необходимо учитывать, что часовой механизм должен быть установлен так, чтобы при втянутом якоре и полностью заведенном механизме между роликом и основным качающимся рычагом был зазор 0,5-1 мм. Учитывается также, что при отпущенном якоре между пальцем заводного рычага часового механизма и вспомогательным рычагом должен быть зазор не менее 0,5 мм.

Проверка состояния изоляции, как правило, производится в полной схеме.

Проверка искрогасительного контура заключается в проверке его элементов.

Проверка выпрямительного устройства ВУ-200 выполняется, если напряжение срабатывания или возврата реле выходит за нормируемые пределы, а также при работе реле с повышенной вибрацией.

Проверка напряжений срабатывания и возврата реле производится с помощью переносного устройства УПЗ-1 (блок К-500) или У5053 (блок К-513). Напряжения измеряются приборами класса точности не ниже 1,5. Напряжение срабатывания реле РВ-217 - РВ-248 определяют при подаче напряжения на реле толчком. Напряжение срабатывания реле РВ-215 - РВ-245 определяют при плавном снижении напряжения. За напряжение срабатывания принимается напряжение, при котором отпадает якорь реле. Напряжение возврата этой группы определяется при подаче напряжения на реле толчком. За напряжение возврата принимается напряжение, при котором якорь реле мгновенно втягивается в сердечник.

При всех измерениях напряжение срабатывания и возврата должно соответствовать указанным в табл. 13.8 значениям.

Регулирование напряжений срабатывания и возврата реле не предусмотрено. Обычно значения напряжений находятся в допустимых пределах. При отклонении напряжения

Файл скачан с www.turbinist.ru

срабатывания и возврата от значений, приведенных в табл. 13.8, эти значения могут быть получены установкой возвратной пружины нормальной жесткости.

Таблица 13.8. Напряжения срабатывания и возврата реле РВ-200

Тип реле	$U_{ср}/U_{ном}$	$U_{в}/U_{ном}$
РВ-217 - РВ-248	$\leq 0,85$	$\geq 0,05$
РВ-215 - РВ-245	0,05-0,55	$\leq 0,8$
РВ-215К - РВ-245К	$\leq 0,35$ (при трехфазном питании) $\leq 0,55$ (при двухфазном питании)	$\leq 0,8$

Проверить отсутствие вибрации контактов реле в подтянутом положении якоря.

Проверка времени срабатывания производится в следующем объеме: измеряется время срабатывания реле на рабочей уставке и на всех уставках тех реле, уставки на которых изменяются оперативным персоналом (например, реле времени в схеме защиты обходного выключателя); измеряется время замкнутного состояния временно замыкающих контактов.

Проверку производят с помощью переносного устройства УПЗ-1 (блок К-500) или У5053 (блок К-513). Измерение времени срабатывания реле следует производить при номинальном значении напряжения.

Разброс времени срабатывания реле, отклонение среднего значения времени срабатывания от уставки по шкале и время замкнутого состояния временно замыкающих контактов при срабатывании реле должны находиться в соответствии со значениями, приведенными в табл. 13.9.

Таблица 13.9. Разброс значений и отклонение от уставки времени срабатывания реле РВ-200

Диапазон уставок, с	Разброс значений, с	Отклонение от уставки, с		Время замкнутого состояния временно замыкающих контактов, с
		минимальной	максимальной	
0,1-1,3	0,06	$\pm$ 0,05	$\pm$ 0,15	0,05-0,12
0,25-3,5	0,12	$\pm$ 0,1	$\pm$ 0,4	0,1-0,4
0,5-9,0	0,25	$\pm$ 0,12	$\pm$ 0,5	0,25-0,75
1,0-20	0,8	$\pm$ 0,2	$\pm$ 1,5	0,6-1,6

Файл скачан с www.turbinist.ru

Проверка реле времени типа РВМ при новом включении производится в следующем объеме: проверка механической части и монтажа элементов реле; проверка изоляции мегомметром 1000 В; испытание электрической прочности изоляции всех токоведущих частей относительно корпуса напряжением 1000 В 50 Гц в течение 1 мин; проверка электрических характеристик; определение напряжения трогания электродвигателя, В; напряжения срабатывания электромагнитного сцепления, В; напряжения возврата электромагнитного сцепления, В; настройка реле на рабочих уставках при $U_{ном}$ и проверка четкости работы реле при 0,8 $U_{ном}$.

Наладка устройств типа УКП. Схема устройства УКП 1-380 представлена на рис. 13.15. Схема устройства УКП1-220 незначительно отличается от схемы УКП1-380 и здесь не приводится. Особенности схемы УКП1-380 следующие. Переключателем S1 осуществляется переключение с рабочей линии на резервную и отключение устройств питания от питающей сети. Сопротивления R1-R6 определяют ток нагрузки на выводах “320 А”, сопротивления R7-R9 - на выводах “150 А”.

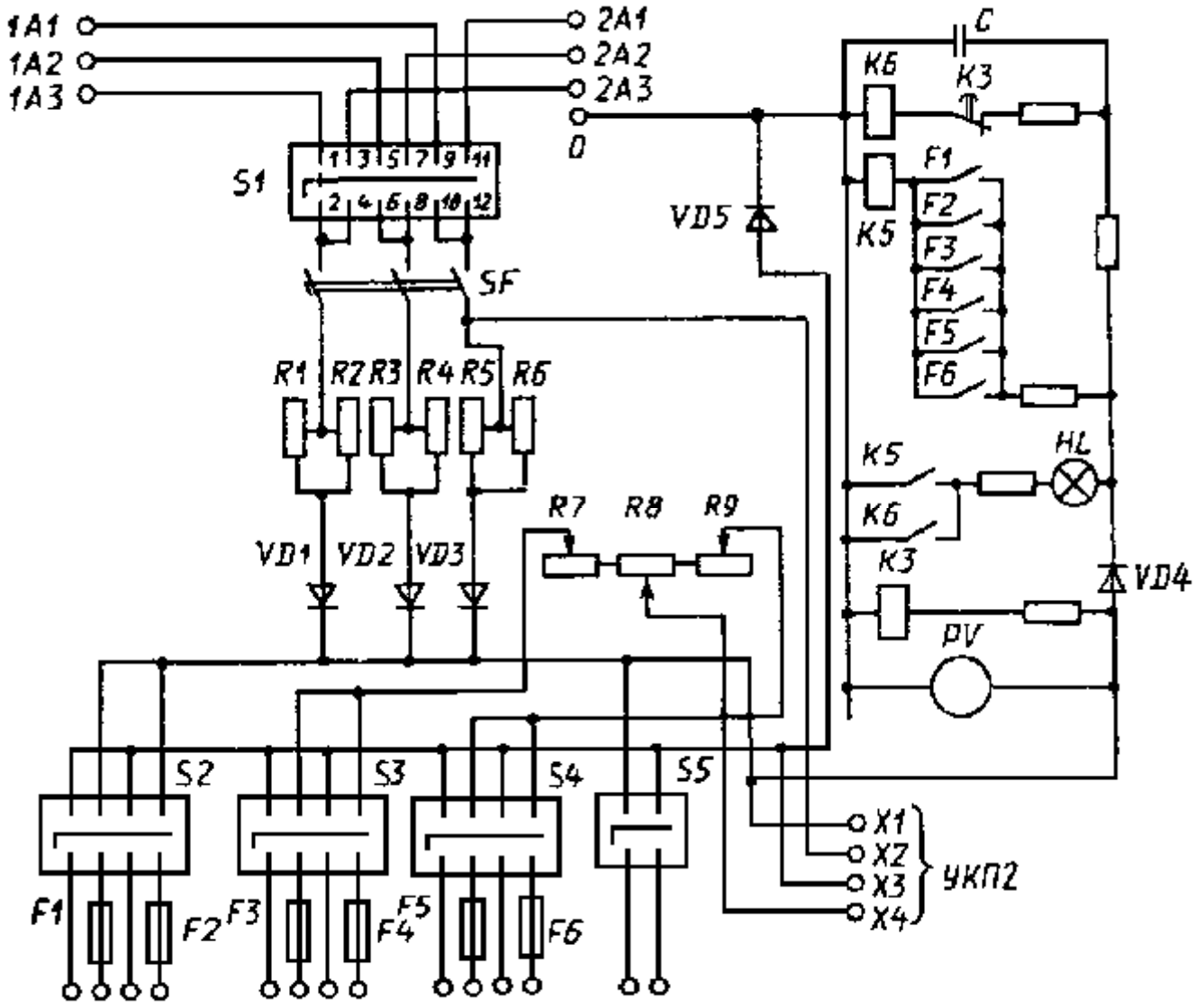


Рис. 13.15. Электрическая принципиальная схема устройства типа УКП1-380

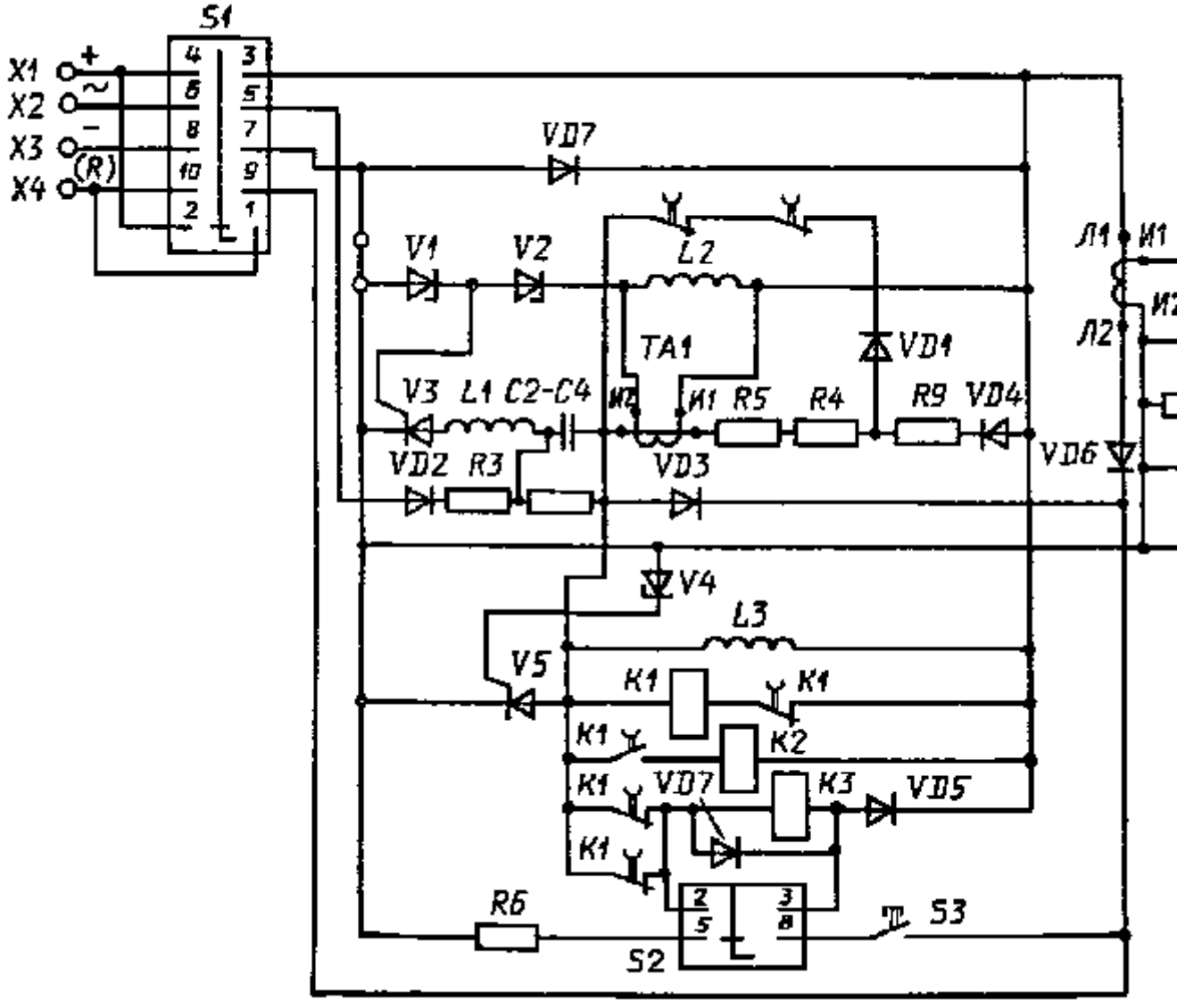
Файл скачан с www.turbinist.ru

Переключатели S3-S5, S6 коммутируют устройство в различных режимах работы. Защита от токов КЗ на стороне выпрямленного напряжения осуществляется быстродействующими предохранителями F1-F12 для УКП 1-220 и F1-F6 для УКП1-380. Сигнальные контакты предохранителей включены в цепь питания указательного реле К5. Автоматический выключатель SF защищает устройство питания от внутренних КЗ и перегрузок. Размыкающий контакт реле КЗ с выдержкой времени 1 с действует на указательное реле К6 при исчезновении выпрямленного напряжения.

Наладка устройства заключается в проверке изоляции и опробовании в различных режимах.

Сопротивление изоляции измеряется относительно корпуса с помощью вольтметра поочередным подключением к шинам “+” и “-“.

Устройство УКП2 (рис. 13.16) содержит катушку индуктивности L3, в которой происходит накопление электромагнитной энергии при подаче напряжения на электромагнит включения выключателей и систему коммутации, обеспечивающую быстрое подключение указанной катушки к электромагниту в случае включения выключателя на КЗ, сопровождающееся резким снижением напряжения.



Файл скачан с www.turbinist.ru

Рис. 13.16. Электрическая принципиальная схема устройства УКП2

Устройство имеет два режима работы: “Работа” и “Опробование”.

В режиме “Работа” переключатель S2 устанавливается в положение “Работа”, переключатель S1 - в положение 1 “Выключено”.

При подаче напряжения на электромагнит включения выключателя через первичную обмотку трансформатора тока ТА2 проходит ток по цепи Х1 (“+” питания), зажимы Л1-Л2 трансформатора тока ТА2, диод VD6, Х4, электромагнит включения выключателя, Х3 (“-“ питания). На зажимах И1-И2 вторичной обмотки трансформатора ТА2 индуктируется импульс напряжения, обеспечивающий открывание тиристора V5, в результате чего:

а) начинает протекать ток в катушке L3;

б) начинается заряд конденсаторов С2-С4 по цепи Х2, VD2, R3, V5, Х3;

в) начинает протекать ток по цепи Х1, VD4, R9, R4, R5 первичная обмотка трансформатора ТА1, V5, Х3;

г) срабатывает реле К1, а затем К2.

Контакты реле К1 и К2 шунтируют вторичную обмотку трансформатора тока ТА2, обеспечивая однократность подачи отпирающего импульса на управляющий электрод тиристора V5.

Если включение выключателя сопровождается возникновением КЗ в сети, напряжение питания УКП2 резко уменьшается, что приводит к резкому уменьшению тока в первичной обмотке трансформатора тока ТА1. При этом на вторичной обмотке ТА1 формируется импульс, открывающий тиристор V3, после чего начинается разряд конденсаторов С2-С4 через катушку L1, тиристоры V3, V5. Ток разряда запирает тиристор V5. Электромагнитная энергия, запасенная в катушке L3, выделяется в электромагните включения выключателя (разряд происходит по цепи L3, VD3, Х4, электромагнит выключателя, Х3, VD7, L3), обеспечивая включение выключателя на КЗ с посадкой механизма привода на защелку в соответствии с требованиями ГОСТ 687-78 Е.

Режим “Опробование” предусмотрен с целью проверки исправности элементов схемы и работоспособности устройства. В этом режиме переключатель S2 переводится в положение “Опробование” (замыкаются контакты 5-8, размыкаются 2-3), после чего замыкается кнопка S3. При этом через первичную обмотку трансформатора ТА2 проходит ток, ограниченный резистором R6. Импульс на вторичной обмотке ТА2 открывает тиристор V5, и схема работает аналогично режиму “Работа” при нормальном включении выключателя.

Разряд индуктивности L3 в режиме “Опробование” происходит через диод VD7, указательное реле К3 и диод VD5 (по цепи L3, контакты реле К1, VD7, К3, VD5, L3). Срабатывание указательного реле свидетельствует об исправности элементов схемы и ее работоспособности.

Измерение сопротивления изоляции производится между выводами токоведущих цепей, не связанных между собой электрически, а также между выводами этих цепей и корпусом. Оно должно быть не менее 10 МОм. Испытания проводятся мегаомметром на напряжение 1000 В.

Для включения в работу в устройстве УКП1 необходимо: переключатель S1 установить в положение 1 “Работа”, переключатель S7 (для устройства питания УКП1-220) - в среднее положение; включить автоматический выключатель S2; включить переключателями S3, S4, S5 нужный выход; показание вольтметра при этом должно соответствовать напряжению холостого хода.

В устройстве УКП2 необходимо: переключатель S1 установить в положение 1 “Включено”, переключатель S2 - в положение “Опробование”; нажать кнопку S3, при этом в исправном

Файл скачан с www.turbinist.ru

УКП2 должен выпасть указатель реле К3, переключатель S2 перевести в положение “Работа”, указательное реле возвратить в исходное положение.

Измерение сопротивления изоляции в устройстве УКП1-220 производится следующим образом:

переключатель S7 устройства УКП1-220 устанавливается в среднее положение “Выпрямленное напряжение”, измеряется напряжение;

переключатель S7 устанавливается в положение “$U_{из}$”, фиксируются показания вольтметра “$U_{из}$”, В;

переключатель S7 устанавливается в положение “$U_{из+}$”, фиксируются показания вольтметра “$U_{из+}$”, В;

определяется сопротивление изоляции “минус”, Ом, по формуле

$$R_{из-} = \frac{129 \cdot 10^3 (U_d - U_{из-} + U_{из+})}{U_{из+}};$$

определяется сопротивление изоляции шины “плюс”, Ом, по формуле

$$R_{из+} = \frac{129 \cdot 10^3 (U_d - U_{из-} + U_{из+})}{U_{из-}};$$

переключатель S7 устанавливается в среднее положение.

В устройстве УКП2 выполняются следующие измерения и регулировки:

измерение индуктивности и активного сопротивления катушек L2 и L3. Параметры этих катушек должны быть в пределах: L2-L-1 мГн ± 10 %; R-3,0 Ом ± 10 %; L3-L-88 мГн ± 10 %, R-0,9 Ом ± 5 %;

проверка и регулировка реле К1 и К2. Обращается внимание на зазор между подвижным и неподвижным контактами (должен быть не менее 2,5 мм), на провал контактных мостиков (должен быть не менее 0,5 мм), на воздушный зазор между якорем и скобой электромагнита в сработанном состоянии (должен быть не менее 0,5 мм для предотвращения залипания якоря из-за остаточного намагничивания).

Проверка блоков питания. Производится внешний осмотр на отсутствие механических повреждений; проверяется монтаж и состояние механической части; производится проверка надежности крепления всех элементов, качества паек и болтовых соединений.

Проверка изоляции производится при вынутом из блока питания поляризованном реле Р типа РП-7(блока БПЗ-401), закороченных конденсаторах и полупроводниковых выпрямителях мегомметром на напряжение 1000 В. При этом проверяется сопротивление изоляции входных и выходных токоведущих цепей между собой и относительно корпуса (должно быть не менее 50 МОм) и сопротивление изоляции поляризованного реле мегаомметром 500 В. (Проверяется также сопротивление изоляции между обмотками, контактами и магнитопроводом реле при различных положениях якоря - оно должно быть не менее 100 МОм).

Файл скачан с www.turbinist.ru

После измерения сопротивления изоляции производится испытание электрической прочности изоляции токоведущих цепей напряжением 1000 В, 50 Гц в течение 1 мин.

Проверка блока питания на рабочих уставках на холостом ходу производится у блоков БПН-11, БПН-1002, БПЗ-401 по схеме, приведенной на рис. 13.17 или 13.18 (для блока БПН-1002).

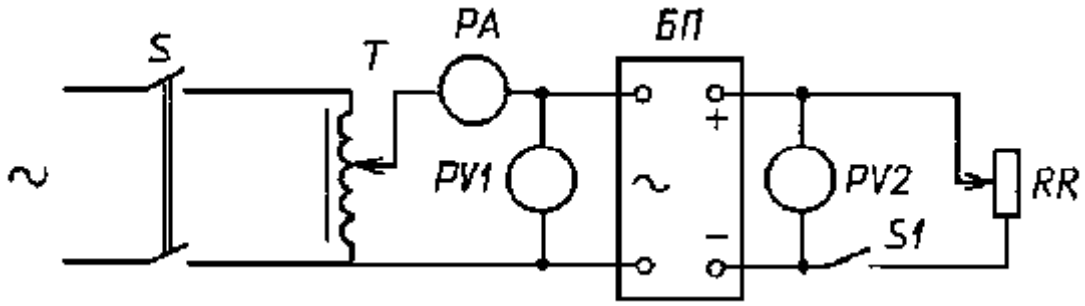


Рис. 13.17. Схема проверки блока питания БПН-11

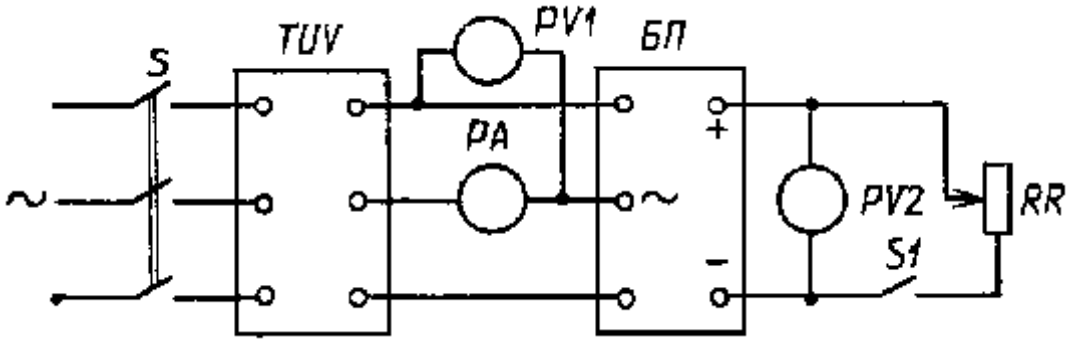


Рис. 13.18. Схема проверки блока питания БПН-1002

При холостом ходе блока питания (ключ SA1 отключен) плавно увеличивается напряжение на его входе от нуля до номинального значения. При напряжении 10-15 % и 100 % номинального измеряется ток холостого хода и выходное напряжение. Ток холостого хода при напряжении на выходе 10-15 % номинального должен составлять не более 10-25% $I_{ном.х}$, а выходное напряжение - 10-15% значений, измеренных при номинальном напряжении.

У блоков БПТ-11, БПТ-1002, БПЗ-402 проверка производится по схеме, приведенной на рис. 13.18.

При холостом ходе блока питания (ключ SA1 отключен) плавно увеличивается ток на входе от нуля до тока наступления феррорезонанса. За ток наступления феррорезонанса принимается максимум входного тока, после которого наблюдается резкое уменьшение тока при практически неизменном положении регулятора автотрансформатора. Если ток соответствует техническим характеристикам (см. табл. 13.4), то блок питания считается исправным.

Проверка блоков питания на рабочих уставках под нагрузкой производится по схеме, приведенной на рис. 13.17 или 13.18.

Файл скачан с www.turbinist.ru

При проверке блоков питания под нагрузкой длительное протекание тока максимальной нагрузки недопустимо, поэтому измерения в этом режиме следует производить быстро, а питание подавать в схему проверки кратковременно.

На выход блока подключается резистор с сопротивлением, соответствующим эксплуатационной нагрузке в режиме максимального потребления.

Измеряется напряжение на выходе блока питания при подаче на его вход напряжения, равного 0,8; 1,0; 1,1 номинального входного напряжения (для блоков БПН-11, БПН-1002, БПЗ-401), или тока, равного 1,0; 1,2; 1,25 уставки наступления феррорезонанса (для блоков БПТ-11, БПТ-1002, БПЗ-402).

По результатам измерений определяется напряжение (ток) надежной работы, т. е. минимальное напряжение (ток) на входе блока питания, при котором обеспечивается напряжение на его выходе, равное 0,8 номинального выходного напряжения.

Проверка поляризованного реле при подключенной нагрузке блока БПЗ-401 производится по схеме рис. 13.17 при подключенной нагрузке (ключ SA1 включен). Напряжение срабатывания реле Р, измеренное на входе блока питания, должно быть не более 0,7 номинального входного напряжения, коэффициент возврата - не менее 0,25.

Определение времени заряда блока конденсаторов до напряжения 0,8 $U_{ном}$ (для блоков БПЗ-401, БПЗ-402) производится по схеме, приведенной на рис. 13.19, с использованием промежуточного реле KL, время срабатывания которого должно приблизительно соответствовать нормируемому времени заряда конденсаторов. Для этого включается ключ S и после срабатывания реле KL сразу измеряется напряжение на блоке конденсаторов, которое должно быть не менее 0,8 номинального входного напряжения. Время заряда должно быть не более 70 мс.

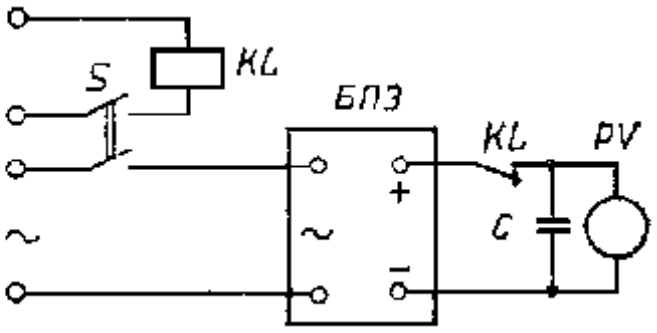


Рис. 13.19. Схема проверки времени заряда блока конденсаторов

Время заряда блока конденсаторов от БПЗ-401 определяется при номинальном входном напряжении, от БПЗ-402 - при трехкратном токе уставки по току наступления феррорезонанса.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Обозначения элементов электрических схем, принятые в книге

Обозначение	Наименование элемента

Файл скачан с www.turbinist.ru

AV	Устройство регулирования напряжения
AC	Устройство АВР
AK	Устройство (комплект) реле токовых защит
AKB	Устройство блокировки типа КРБ
AKS	Устройство АПВ
AKV	Устройство комплектное продольной дифзащиты ЛЭП
AKZ	Устройство комплектное реле сопротивления
AR	Устройство комплектное реле УРОВ
C	Конденсатор
EA1	Шинка вспомогательная (711)
EA2	Шинка вспомогательная (713)
EAH	Шинка вспомогательная собирательная
EA.A	Шинка вспомогательная напряжения (А790)
EA.C	Шинка вспомогательная напряжения (С790)
EB	Шинка блокировки
+EC	Шинка управления “+”
-EC	Шинка управления “-“
ECS1	Шинка синхронизации (721)
ECS2	Шинка синхронизации (722)
ECS3	Шинка синхронизации (723)
ECS4	Шинка синхронизации (724)
+EH	Шинка сигнализации “+”
-EH	Шинка сигнализации “-”
EHA	Шинка сигнализации аварийной
EHP	Шинка сигнализации предупредительной
EHT	Шинка сигнализации технологической
(+) EP	Шинка мигания
EPD	Шинка съема мигания
ES1.A	Шинка напряжения синхронизации (А610)
ES1.C	Шинка напряжения синхронизации (С610)

Файл скачан с www.turbinist.ru

ES2.A	Шинка напряжения синхронизации (А620)
ES2.C	Шинка напряжения синхронизации (С620)
ESD	Шинка напряжения синхронизации (А780)
EV1.A	Шинка напряжения (1Т с обмотками, соединенными в звезду)
EV1.B	Шинка напряжения (1Т с обмотками, соединенными в звезду, В600)
EV1.C	Шинка напряжения (1Т с обмотками, соединенными в звезду, С600)
EV1.N	Шинка напряжения нейтрали (1Т с обмотками, соединенными в звезду, С600)
EV1.H	Шинка напряжения нейтрали (1Т с обмотками, соединенными в разомкнутый треугольник, Н600)
EV1.U	Шинка напряжения нейтрали (1Т с обмотками, соединенными в разомкнутый треугольник, И600)
EV1.K	Шинка напряжения (1Т с обмотками, соединенными в разомкнутый треугольник)
EV1.F	Шинка напряжения (1Т с обмотками, соединенными в разомкнутый треугольник)
EVM.1	Шинка защиты минимального напряжения (011)
EVM.2	Шинка защиты минимального напряжения (013)
EY	Шинка питания приводов выключателей
HL	Прибор световой сигнализации
HLA	Световое табло
HLG	Лампа с линзой зеленой
HLR	Лампа с линзой красной
HLW	Лампа с линзой белой
HV	Ионный полупроводниковый сигнализатор
FU	Плавкий предохранитель
FV	Разрядник
K	Реле
KA	Реле тока
KAT	Реле тока с насыщающимся трансформатором
KAW	Реле тока с торможением
KAZ	Реле тока фильтровое
KB	Реле блокировки

Файл скачан с www.turbinist.ru

KH	Реле указательное
KHA	Реле импульсной сигнализации
KL	Реле промежуточное, исполнительный орган
KM	Контактор, пускатель
KQC	Реле положения “Включено”
KQT	Реле положения “Отключено”
KSG	Реле газовое
KSV	Реле контроля цепей напряжения
KT	Реле времени
KV	Реле напряжения
KW	Реле мощности
KZ	Реле сопротивления
L	Реактор, дроссель, дугогасительная катушка
M	Двигатель
PA	Амперметр
PC	Счетчик импульсов
PF	Частотомер
PHE	Указатель положения
PO	Осциллограф
PQ	Указатель РПН
PS	Синхроноскоп
PT	Секундомер, часы
PTY	Секундомер электрический (с электромагнитным приводом)
PTV	Секундомер электронный
PV	Вольтметр
PW	Ваттметр
R	Резистор
RP	Потенциометр
RR	Реостат
Q	Рубильник, выключатель силовых цепей

Файл скачан с www.turbinist.ru

S	Рубильник, выключатель вспомогательных цепей, коммутационное устройство
SA	Переключатель, ключ вторичных цепей
SAB	Переключатель, ключ в цепях блокировки
SB	Кнопка
SF	Автоматический выключатель
SG	Блок испытательный
SQ	Путевой выключатель конечный
SX	Накладка оперативная
T	Трансформатор
TA	Трансформатор тока
TAN	Трансформатор тока нулевой последовательности
TAV	Трансреактор
TL	Трансформатор промежуточный, нагрузочный, безопасности
TUV	Трансформатор регулировочный
TV	Трансформатор напряжения
UV	Фазорегулятор, преобразователь напряжения
UVM	Фазорегулятор моторный
V	Электронный прибор
VC	Выпрямитель
VD	Диод, стабилитрон
VL	Электровакуумный прибор
VS	Тиристор
VT	Транзистор
X	Устройство соединительное
XA	Испытательный блок
XG	Испытательный зажим
XN	Соединение неразборное
XP	Соединение контактное, штырь
XS	Соединение контактное, гнездо
XT	Соединение разборное

Файл скачан с www.turbinist.ru

XW	Соединение ВЧ
YAC	Электромагнит включения
YAT	Электромагнит отключения

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Спецификация на приставку П-77-1 к ВАФ-85

Обозначение по схеме	ГОСТ, ТУ	Тип	Количество, шт.
R1	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,5 510К ± 10%	1
R2	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,5 360 Ом ± 10%	1
R3	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,25 1 к ± 10%	1
R4*	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,25 15-25 к	1
R6*	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,25 3,5-6 к	1
R8*	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,25 5-20 к	1
R10	ГОСТ 7113-66, ВД 7113-71	МЛТ-0,25 1 к ± 10%	1
R5, R7, R9	ОЖО, 468, 047, МРТУ	СПО-0,15 3,3 ± 20%	3
С1, С2	ОЖО, 461, 077, МРТУ	К76-3 1,5 × 250 В ± 10%	2
С3, С4	ОЖО, 464, 031, МРТУ	К50-6 20×15 В $^{+80\%}_{-20\%}$	2
С5	ОЖО, 460, 020, ТУ	КЛС-1 1000 пф ± 20%	1
С6	ОЖО, 464, 044, МРТУ	К53-1А 0,22 × 20В ± 20%	1
С7	ОЖО, 463, 032, ТУ	МБМ	1

Файл скачан с www.turbinist.ru

		1,0 × 160В ± 10%	
С8	ОЖО, 464, 044, МРТУ	К53-1А 1,5 × 30В ± 20%	1
V1-V4	Ц23, 362, 003	КД105В	4
V5	ГОСТ 17126-71	Д816В	1
V6, V7	ГОСТ 14913-69	Д814	2
А1	БКО, 348, 095 ТУ	Микросхема К1УТ401Б	1
Х1-Х4	ГАО, 364, 008 ТУ	Штепсель ШПЧ-2	4
Х5, Х6	ГАО, 564, 010 ТУ	Розетка РД1	1

* Подбирается при настройке.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Новые реле (устройства); их краткая характеристика

Внедрение в последнее время новых устройств в релейной защите привело к появлению реле и комплектов, выполненных с широким применением микроэлектроники, технические данные наиболее распространенных из них приведены ниже.

Реле максимального тока серий РСТ 11, РСТ 13, РСТ 12, РСТ 14 применяются в качестве измерительных реле в схемах релейной защиты и автоматики энергосистем. Реле в основном используются в различных комплектных устройствах, от которых требуется повышенная устойчивость к механическим воздействиям.

Номинальные данные: реле серий РСТ 11, РСТ 13 предназначены для применения в цепях переменного тока частотой 50 Гц, реле серий РСТ 12, РСТ 14 - в цепях частотой 60 Гц. Напряжение питания реле серий РСТ 11, РСТ 12 - переменное 220 В; реле серий РСТ 13, РСТ 14 - постоянное 220 В. Пределы уставок тока срабатывания реле всех серий с индексом: 04-(0,05-0,2) А; 09-(0,15-0,6) А; 14-(0,5-2,0) А; 19-(1,5-6,0) А; 24-(5-20) А; 29-(15-60) А; 32-(30-120) А. Коэффициент возврата на любой уставке не менее 0,9. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты.

Реле максимального напряжения серий РСН 14, РСН 15 и минимального напряжения серий РСН 16, РСН 17 применяются в качестве измерительных реле в схемах релейной защиты и автоматики энергосистем. Реле в основном используются в комплектных устройствах, от которых требуется повышенная устойчивость к механическим и ударным воздействиям.

Номинальные данные: реле серий РСН 14, РСН 15, РСН 16, РСН 17 предназначены для применения в цепях переменного напряжения частотой 50 или 60 Гц. Напряжение питания реле серий РСН 15, РСН 17 - переменное 220В, реле серий РСН 14, РСН 16 - постоянное 220 В. Пределы уставок напряжения срабатывания реле серий РСН 14, РСН 15 с индексом: 23-(12-60) В; 25-(15-75) В; 28-(40-200) В; 30-(50-250) В; 33-(80-400) В; реле серий РСН 16, РСН 17 с индексом: 23-(12-60) В; 28-(40-200) В; 33-(80-400) В. Коэффициент возврата на любой уставке

Файл скачан с www.turbinist.ru

реле максимального напряжения не менее 0,9, реле минимального напряжения 1,1. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты.

Реле сдвига фаз РСФ-11 взамен РН-55, предназначены для применения в схемах автоматического повторного включения ЛЭП с двусторонним питанием в качестве органа, контролирующего наличие напряжения на линии и угол сдвига фаз напряжения на линии и напряжения на шинах станции или подстанции. Реле отличаются повышенной устойчивостью к механическим воздействиям.

Номинальные данные приведены в табл. П3.1.

Таблица П3.1. Номинальные данные реле

Тип реле	Напряжение, В		Частота, Гц
	первой цепи (от шин)	второй цепи (от линии)	
РСФ 11-09	60	30	50 или 60
РСФ 11-12	60	60	
РСФ 11-13	100	30	
РСФ 11-16	100	60	
РСФ 11-20	100	100	

Уставки срабатывания реле по углу сдвига фаз при номинальных напряжениях: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70°. Регулировка угла - дискретная. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты.

Реле мощности РМ 11 взамен РБМ-171, РМ 12 взамен РБМ-178 предназначены для применения в качестве органа направления мощности.

Номинальные данные: напряжение 100 В; ток 1 или 5 А; частота 50 Гц; напряжение оперативного постоянного тока 220 или 110 В; угол максимальной чувствительности РМ 11 ($-30 \pm 5°$) с возможностью переключения на угол ($-45 \pm 5°$); РМ 12 ($70 \pm 5°$); коэффициент возврата не менее 0,8. Напряжение срабатывания реле типа РМ 11 - не более 0,25 В; напряжение срабатывания реле типа РМ 12 регулируется ступенями ($1,0 \pm 0,1$) В; ($2,0 \pm 0,2$) В; ($3,0 \pm 0,3$) В. Область (зона) срабатывания реле по углу не менее 165 и не более 180°.

Реле тока обратной последовательности РТФ 8 взамен РТФ 1М предназначены для защиты различных электрических установок при несимметричных КЗ.

Номинальные данные: ток 1 или 5 А; напряжение оперативного постоянного тока 220 или 110 В; коэффициент возврата 0,95. Диапазон регулировки уставок по току обратной последовательности (0,3-1,2) $I_{ном}$, реле имеет один реагирующий орган с двумя замыкающими контактами.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Реле тока обратной последовательности РТФ 9 взамен РТФ-7 предназначен и для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных КЗ и перегрузке токами обратной последовательности.

Номинальные данные: ток 1,5 или 10 А; напряжение оперативного постоянного тока 220 или 110 В; коэффициент возврата 0,95. Диапазон регулировки уставок по току обратной последовательности: первого реагирующего органа (0,04-0,16) $I_{ном}$; второго реагирующего органа (0,4-1,6) $I_{ном}$. Реле имеет два реагирующих органа с двумя замыкающими контактами каждый.

Реле напряжения обратной последовательности РСН 13 взамен РНФ-1 предназначены для использования в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричных КЗ.

Номинальные данные: напряжение входной воздействующей величины - 100 В; частота 50 или 60 Гц; напряжение постоянного тока вспомогательной воздействующей величины 220 В; коэффициент возврата 0,9. Диапазон регулирования уставок по напряжению обратной последовательности (6-24,6) В, реле имеет реагирующий орган с одним замыкающим и одним размыкающим контактами.

Реле тока дифференциальное РСТ 15, РСТ 16 взамен РНТ-565 предназначены для использования в схемах дифференциальной защиты одной фазы электродвигателей 6-10 кВ и силовых трансформаторов.

Номинальные данные: ток 5 А; частота РСТ 15 50 Гц, РСТ 16 60 Гц; напряжение оперативного постоянного тока 220 В; коэффициент возврата не менее 0,75; время срабатывания - не более 0,04 с. Реле имеет следующие уставки по току срабатывания $I^{*}_{ср}$ в долях номинального тока 0,4; 0,5; 0,65; 0,9; 1,2 при коэффициенте кратности шкалы К = 1, предусмотрена также возможность дискретного увеличения уставок в 2 раза (К = 2). Реле имеет один замыкающий контакт.

Блок защиты генераторов типа БРЭ 1301 предназначен для применения в схемах защиты от замыкания на землю в обмотке статора генераторов энергоблоков; БРЭ 1301.01 взамен ЗЗГ-1 для энергоблоков, в нейтрали обмотки статора генератора которых установлен трансформатор напряжения или дугогасящий реактор; БРЭ 1301.02 взамен ЗЗГ-2 для энергоблоков с изолированной нейтралью.

Номинальные данные: напряжение питания 100 В, частота 50 или 60 Гц; напряжение оперативного постоянного тока 220 В. Уставка срабатывания реле напряжения 5; 10; 15; 20 В. Пределы регулирования относительного сопротивления (коэффициента торможения реле с торможением для БРЭ 1301.01) 0,3-3,0. Отношение скачкообразно изменившегося напряжения после замыкания обмотки статора на землю к напряжению до замыкания при срабатывании реле производной (для БРЭ 1301.02) $1,25 \pm 0,125$. Блок имеет два исполнительных органа (выходных реле) с одним переключающим контактом каждый.

Комплектное устройство защиты ЯРЭ 2201 предназначено для установки в комплектные распределительные устройства напряжением 6-10 кВ и выполняет все функции защиты и автоматики одного или нескольких присоединений. Устройство представляет собой набор блоков, различные сочетания которых позволяют выполнить различные виды защит: максимальную токовую, токовую с зависимой выдержкой времени, дифференциальную токовую, защиту от замыканий на землю, устройство автоматического включения резервного питания, автоматического повторного включения и т. д. Блоки устройства размещены в кассете, заключенной в металлическую оболочку.

Номинальные данные: переменное напряжение 100 В; переменный ток 5 А; частота 50 Гц; напряжение оперативного постоянного тока 110 или 220 В.

Блок реле сопротивлений типа БРЭ 2801 взамен КРС-1 предназначен для использования в качестве пусковых или измерительных дистанционных органов в различных схемах релейной

Файл скачан с www.turbinist.ru

защиты и реагирует на установленное значение комплексного сопротивления на входных зажимах.

Номинальные данные: переменный ток 1 или 5 А; переменное напряжение 100 В; частота 50 или 60 Гц. Напряжение оперативного постоянного тока 110 или 220 В. Исполнение по сопротивлению срабатывания 5 (1) или 20 (4) Ом на фазу (в скобках приведены данные для исполнения на 5 А).

Характеристика срабатывания реле сопротивления может иметь вид окружности или эллипса, проходящих через начало координат, смещенных в I или III квадрант или с центром в начале координат, что определяется режимными перемычками на лицевой панели реле. Для исполнения по сопротивлению срабатывания 5 (1) Ом на фазу минимальные значения уставок, регулируемые переключением в цепях тока 1,25 (0,25); 2,5 (0,5); 5 (1) Ом на фазу; диапазон токов 10 %-ной точности для реле данного исполнения 0,28-40 А (1,4-200) А.

Шкафы дистанционной и токовой защиты типов ШДЭ 2801, ШДЭ 2802 взамен ЭПЗ-1636 предназначены для использования в качестве основной или резервной защиты ЛЭП 110-220 кВ с двусторонним питанием, а также в качестве резервной защиты линий 330 кВ необорудованных ОАПВ.

Шкаф ШДЭ 2801 содержит основной комплект защит, в который входят:

1) дистанционная защита, предназначенная для действия при всех видах многофазных КЗ. Содержит три ступени, каждая из которых выполняется с помощью трех дистанционных измерительных органов, устройство блокировки при неисправностях в цепях напряжения и органы выдержки времени, обеспечивающие требуемое замедление ступеней;

2) четырехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности, предназначенная для действия при КЗ на землю. Защита содержит по одному измерительному органу тока в первой, второй и третьей ступенях, два измерительных органа тока в четвертой ступени, орган направления мощности двустороннего действия, выполненный в виде двух реле, и органы выдержки времени, обеспечивающие требуемое замедление ступеней;

3) токовая отсечка от многофазных замыканий в двухрелейном исполнении;

4) реле УРОВ, включаемое на токи трех фаз;

5) преобразовательный блок питания и стабилизатор напряжения.

Шкаф ШДЭ 2802 содержит основной комплект защит, входящий в шкаф ШДЭ 2801, а также резервный комплект защит, в который входят:

1) дистанционная защита, содержащая две ступени, каждая из которых выполняется с помощью трех дистанционных измерительных органов, и органов выдержки времени, обеспечивающих требуемое замедление ступеней. Предусмотрено совместное действие дистанционной защиты резервного комплекта с устройством блокировки при качаниях и блокировки при неисправностях в цепях напряжения основного комплекта, при этом при исчезновении оперативного постоянного тока основного комплекта дистанционная защита резервного комплекта остается в действии. Предусмотрена возможность срабатывания второй ступени дистанционной защиты резервного комплекта без пуска от устройства блокировки при качаниях;

2) двухступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности, выполненная аналогично органам защиты основного комплекта;

3) преобразовательный блок питания и стабилизатор напряжения.

Блоки шкафа расположены в кассетах, схемы защит выполнены с широким применением микроэлектроники; на плите, устанавливаемой в нижней части шкафа, размещены элементы схемы опробования и выходные реле.

Файл скачан с www.turbinist.ru

Номинальные данные: переменный ток 1 или 5 А; переменное напряжение 100 В; частота 50 или 60 Гц. Напряжение оперативного постоянного тока 110 или 220 В.

Список литературы

1. Переносные устройства для наладки электроустановок/О.А. Гильчер, А.К. Кудрявцев, В.П. Кудряков и др. М.: Энергия, 1980.

2. Общая инструкция по проверке устройств релейной защиты, электроавтоматики и вторичных цепей. М.: Энергия, 1975.

3. Фокин Г.Г., Хомяков М.Н. Панели дистанционных защит ПЗ-2/1 и ПЗ-2/2. М.: Энергия, 1975.

4. Таубес И.Р. Релейная защита мощных турбогенераторов. М: Энергоиздат, 1981.

5. Вавин В.Н. Релейная защита блоков генератор-трансформатор. М.: Энергоатомиздат, 1983.

6. Гомберг А.Е. Описание, монтаж и наладка газового реле. М.: Главтехстройпроект Минэнерго СССР//Экспресс-информация. № 9, 1969.

7. Инструкция по наладке и эксплуатации газовой защиты с реле РГЧЗ-66М. М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1971.

8. Инструкция по эксплуатации газовых реле BF/80/Q и струйных реле ÜRF 25/10 защиты трансформаторов и устройств РПН. М.: СПО “Союзтехэнерго”, 1979.

9. Справочник реле защиты и автоматики/Под ред. М.Э. Хейфица. М.: Энергия, 1972.

10. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций/Под ред. Э.С. Мусаэляна. М.: Энергоатомиздат, 1984.

11. Инструкция по наладке, проверке к эксплуатации реле прямого действия. М.: СПО ОРГРЭС, 1975.

12. Гельфанд Я.О. Голубев М.П., Царев М.И. Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе. - 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. М.И. Царева. М.: Энергия, 1973.

Текст документа сверен по:
официальное издание
М.: Энергоатомиздат, 1989

Файл скачан с www.turbinist.ru