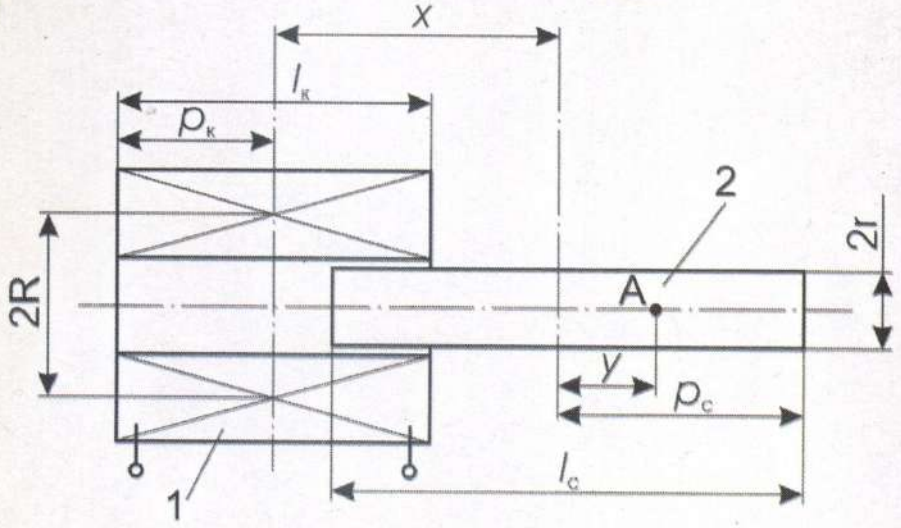
А. В. Федотов

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ



Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

А.В. Федотов

Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля

Омск
Издательство ОмГТУ
2011

УДК 531.7.08: 621.317.39
ББК 34.9
Ф34

Рецензенты:
Ю.П. Котелевский, канд. техн. наук;
В.А. Григорьев, канд. техн. наук.

Федотов, А.В.
Ф34 **Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля**: монография / А.В. Федотов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 176 с.

ISBN 978-5-8149-1040-0

Приводятся результаты библиографичеких исследований в области теории и расчета индуктивных измерительных преобразователей перемещений, и дается анализ важнейших научных работ, посвященных рассматриваемой тематике. Основное внимание уделено диссертационным работам.

Работа может быть полезна научным работникам, аспирантам и специалистам, выполняющим исследования и проектные работы в области автоматизированных индуктивных измерительных систем для линейных измерений.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета

УДК 531.7.08:621.317.39
ББК 34.9

© ГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 2011

ISBN 978-5-8149-1040-0

Введение

В машиностроении и металлообработке основными средствами комплексной механизации и автоматизации производственных процессов являются: автоматическое технологическое оборудование, станки с электронными системами управления (ЧПУ), автоматические линии, обрабатывающие центры, автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), промышленные роботы, гибкие производственные модули (ГПМ), автоматизированные технологические комплексы (АТК) и гибкие производственные системы (ГПС). Степень совершенства этих средств автоматизации во многом определяется совершенством примененной системы управления, причем последние на современном уровне реализуются с использованием микропроцессоров, программируемых контроллеров и микроЭВМ. Система управления будет совершенной в том случае, когда она замкнута. Последнее обстоятельство предполагает введение в систему обратных связей, что возможно при наличии в системе контрольно-измерительных устройств и датчиков. Причем от совершенства последних в значительной мере зависит совершенство и возможности всей системы управления.

При современном состоянии производства станки могут обеспечить обработку линейных размеров деталей с относительной погрешностью до 10^{-6}. Однако в области автоматизации измерений в процессе обработки и непрерывного управления процессом еще имеются проблемы, связанные с разработкой датчиков и измерительных устройств, обеспечивающих столь высокие точности.

Датчики и измерительные устройства должны быть высокопроизводительны, обеспечивать дальнейшее повышение точности измерений, иметь возможность работы в автоматическом режиме с управлением технологическим оборудованием, обладать встроенными возможностями обработки измерительной информации ("интеллектуальные" измерительные устройства), обеспечивать совместную работу с вычислительными устройствами и ЭВМ в автоматизированных системах контроля и управления.

Производственные затраты на измерительную технику неизбежно растут и на передовых промышленных зарубежных предприятиях составляют до 15-20% от общей стоимости технологического оборудования. Эта доля имеет тенденцию дальнейшему росту.

При механической обработке изделий в машиностроении и металлообрабатывающей промышленности, в основном, приходится управлять перемещениями различных исполнительных органов или размерами обрабатываемых деталей. Так удельный вес линейно-угловых измерений в общем

объеме производственных измерений в отечественном машиностроении составляет 90-95%, при производстве электронной аппаратуры – до 50-60%. В зарубежной производственной практике на долю линейных измерений приходится до 80-90% задач контроля качества. Таким образом, измерительные устройства и датчики для линейных и угловых перемещений являются важной составляющей автоматизированных систем управления технологическим оборудованием и процессами в машиностроении и металлообработке.

Наибольшее распространение в производственной практике получили электронные измерительные устройства, удельный вес которых составляет 65-70%, среди последних главное место занимают устройства с индуктивными и индукционными первичными измерительными преобразователями. Необходимо отметить, что на основе использования индуктивных преобразователей перемещений строятся датчики самых различных неэлектрических величин: линейных размеров и их производных (линейных и угловых размеров, уровня жидкости, продольных деформаций, линейной и угловой скорости, механических колебаний); сил и их производных (силы, крутящие моменты, механическая работа, механическая мощность); масс и производных величин (масса, расход, плотность); гидростатических и гидродинамических величин (давление, скорость потоков). Для измерения перечисленных величин индуктивный измерительный преобразователь снабжается соответствующим чувствительным элементом, преобразующим измеряемую величину во входное перемещение индуктивного преобразователя. Индуктивный измерительный преобразователь перемещений при этом является основной составляющей полученного такой комбинацией элементов датчика измеряемой величины. Достоинством индуктивных датчиков является простота конструкции, хорошая помехоустойчивость, возможность получения высоких метрологических характеристик и простота построения вторичных преобразовательных элементов. Индуктивные измерительные устройства серийно выпускаются инструментальными заводами и фирмами во всех промышленно развитых странах.

Анализ метрологических характеристик, достигнутых у современных индуктивных приборов, и сравнение их с расчетными возможностями таких приборов [253, 283] показывают, что еще значительные резервы не использованы и это, особенно, касается самих первичных индуктивных преобразователей. В частности, расчетный порог чувствительности для индуктивных приборов составляет 0,01-0,001 мкм, а относительная погрешность может быть уменьшена до 10^{-5}. Эти величины только частично достигнуты в современных приборах, и их полная реализация требует проведения исследований.

Индуктивный метод получения и преобразования информации о различных неэлектрических величинах издавна привлекает к себе внимание исследовате-

лей благодаря своим достоинствам. В области теории и практики индуктивных измерительных преобразователей перемещений известен значительный вклад таких исследователей, как В.Н.Мильштейн [156, 157], Е.И.Дмитриев [71], Б.С.Сотсков [218, 219], Л.Ф.Куликовский [134, 135, 136, 138, 139], Ф.А.Ступель [225, 226], Б.К.Буль [40, 41, 42], Л.Я.Цикерман [257], М.Ф.Зарипов [79, 80, 85, 138], М.И.Белый [27, 28, 29, 30], Ю.С.Русин [200, 201], Н.Е.Конюхов [117, 118, 139], Л.А.Срибнер [223], С.А.Розентул [50, 196], положивших начало разработке индуктивных измерительных средств в нашей стране, создавших научные школы и обеспечивших разработку серийных приборов. Для каждого из авторов указаны лишь основные работы. Общее число исследователей индуктивного метода получения и преобразования первичной измерительной информации значительно больше, что нашло отражение в списке литературы, приводимом в данной работе.

Однако нельзя считать разработку теории индуктивных измерительных преобразователей законченной, поскольку, на каждом этапе ее развития появляются новые задачи и проблемы. Характерными особенностями современной теории индуктивных измерительных преобразователей являются: разработка самостоятельных математических моделей для отдельных разновидностей индуктивных преобразователей; разработка элементов их теории в основном, применительно к задаче анализа преобразователей; недостаточный учет метрологического назначения преобразователя при построении их математической модели; частичное решения задач синтеза и оптимизации конструкции индуктивных измерительных преобразователей с точки зрения их метрологических характеристик.

Кроме этого, полнота разработки теории различна для различных типов индуктивных преобразователей. Так, наиболее разработана теория индуктивных измерительных преобразователей с распределенными электромагнитными параметрами [27, 30, 80, 117, 139, 252], для других типов индуктивных измерительных преобразователей, являющихся к тому же более распространенными, степень разработки их теории отличается существенно меньшей полнотой.

Продолжаются интенсивные конструктивные усовершенствования первичных индуктивных измерительных преобразователей, направленные на улучшение их метрологических характеристик. Так за период с 1970 г. по нашим неполным подсчетам в нашей стране выдано около 100 авторских свидетельств и патентов на усовершенствованные индуктивные измерительные преобразователи перемещений. При этом целью изобретений названо улучшение метрологических характеристик преобразователя: расширение диапазона

измерения, повышение точности, уменьшение различных составляющих погрешности преобразователя, повышение чувствительности.

Таким образом, проблему совершенствования первичных индуктивных измерительных преобразователей, исходя из их метрологических и эксплуатационных характеристик, нельзя отнести к числу закрытых проблем и более того, при наблюдающемся расширении использования индуктивных измерительных преобразователей в составе автоматизированных информационно-измерительных систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами, эта проблема приобретает все более важное значение.

Разработка теории индуктивных измерительных преобразователей, достаточно полно учитывающей их метрологическую сущность, актуальна также при разработке систем автоматизированного проектирования (САПР) измерительных средств. Для индуктивных измерительных преобразователей основой при построении САПР является математическая модель преобразователя, разработанная с учетом его основного метрологического назначения. Эффективность этой модели во многом определит и эффективность автоматизированного проектирования преобразователей, и особенно эффективность оптимизации их конструкций. Естественно, что такая модель должна иметь, по возможности, общий характер, единый для разных типов индуктивных измерительных преобразователей. Это существенно с точки зрения упрощения программного обеспечения САПР индуктивных измерительных преобразователей и сокращения объема требуемых программ.

Период становления теории индуктивных измерительных преобразователей приходится на пятидесятые - семидесятые годы 19-го столетия. Именно в этот период индуктивные измерительные преобразователи были выделены в особую группу электромагнитных устройств специфического метрологического назначения и были заложены основы их теории. Новые конструкции преобразователей с улучшенными метрологическими характеристиками непрерывно создавались основными производителями контрольно-измерительных приборов во всех промышленно развитых странах. В нашей стране и в зарубежных странах в этот период было опубликовано большое число научных работ по теории, расчету и проектированию индуктивных измерительных преобразователей, в том числе работ выполненных на уровне диссертаций на соискание ученых степеней доктора или кандидата технических наук.

Это не значит, что в настоящее время все проблемы, связанные с расчетом и проектированием индуктивных преобразователей, решены, и исследование таких преобразователей потеряло свою актуальность. Проблем в этой области достаточно и исследования продолжаются. В то же время при поведении серьезного исследования полезно проследить ретроспективу развития того или

иного направления теории индуктивных преобразователей, что связано с необходимостью поиска и изучения большого объема публикаций.

В данной работе выполнен обзор, предварительный анализ и оценка опубликованных научных работ, посвященных теории и расчету индуктивных измерительных преобразователей. По каждой работе предложено короткое резюме, достаточное для того, чтобы судить о направленности работы и основных полученных результатах. Также в работе осуществлена систематизация научных работ по их направленности и полученным результатам, предложена классификации индуктивных измерительных преобразователей на основе особенностей их математических моделей.

Не претендуя на всеобъемлющую полноту, обзор включает сведения об основных отечественных работах в данной области и значительный объем сведений по доступным зарубежным работам. Использование данного обзора может существенно сократить объем необходимых библиографических исследований и осуществить целенаправленный отбор работ для детального изучения в зависимости от поставленной задачи исследования.

1. Анализ состояния теории индуктивных измерительных средств

1.1. Современное состояние производства индуктивных измерительных преобразователей

В гибком автоматизированном производстве геометрические измерения становятся все более важными, так как они дают возможность ускорить процесс внедрения в производство новых разработок, достичь высокого качества продукции, снизить затраты и, в результате, получить высокую прибыль. Приборы для автоматизации контроля размерных параметров продукции выпускаются ведущими приборостроительными фирмами промышленно развитых стран в широкой номенклатуре.

Заметная доля этого рынка принадлежит группе производителей Hexagon Metrology. Группа Hexagon Metrology является частью компании Hexagon Measurement Technologies. Эта группа объединяет такие ведущие бренды промышленной измерительной техники как Brown & Sharpe, CE Johansson, CimCore, CogniTens, DEA, Leica Geosystems (Metrology Division), Leitz, PC-DMIS, Quindos, ROMER, Sheffield и TESA. Группой поставлено свыше 50 000 КИМ, более 7 500 мобильных систем и больше чем 30 000 лицензий на популярное измерительное программное обеспечение PC-DMIS. Все это позволяет заказчикам группы Hexagon Metrology полностью контролировать производ-

ственный процесс с тем, чтобы изготовленные детали в точности соответствовали планам конструкторов.

При высокоточных линейно-угловых измерениях в производстве широко используются индуктивные приборы. Метрологические характеристики индуктивных измерительных приборов в первую очередь определяются индуктивным первичным измерительным преобразователем в составе прибора. Современные индуктивные датчики перемещений и размеров обладают малыми габаритами, высокой чувствительностью и малой погрешностью, что позволяет создавать на их основе измерительные приборы с разрешением в доли микрометра.

В качестве примера в табл. 1 приведены характеристики малогабаритных индуктивных датчиков с наружным диаметром Ø8 мм. Для датчиков фирмы Hexagon Metrology Tesa (Tesa) дополнительно указывается, что датчики имеют малую массу подвижных частей, что позволяет с их использованием измерять колебательные перемещения с частотой до 60 Гц [298,299,300,301].

Таблица 1

Производитель	Диапазон измерения, мм	Стандартное отклонение дисперсии результата, мкм	Максимально допустимая нелинейность характеристики, мкм
Tesa	± 0,2	0,01	$0,07+0,4\cdot L$
	± 2,0	0,01	$0,2+3\cdot L^3$
	± 5,0	0,05	$1+4\cdot L$
Mahr GmbH	± 0,5	0,15	1,5
	± 2,0	0,1	3,0
	± 5,3	0,2	20,0
Marposs GmbH	± 1,0	0,1	5,0
	± 5,0	0,4	50,0

Основной конструктивной схемой современных датчиков для линейных измерений является соленоидная: разомкнутый ферромагнитный сердечник перемещается внутри системы катушек.

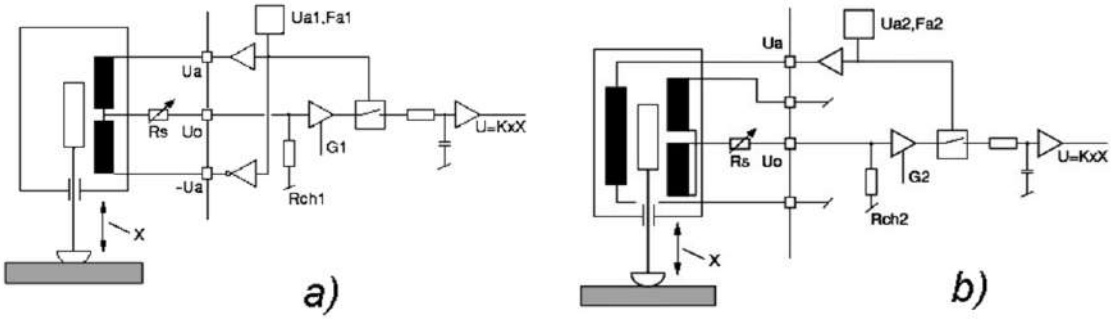


Рис. 1. Схемы индуктивных датчиков Tesa

В качестве примера на рис. 1 показаны принципиальные схемы датчиков фирмы Tesa в варианте мостовой *a)* и трансформаторной *b)* схемы включения [302]. Характеристики этих вариантов близки. Подобные принципиальные решения используют и другие фирмы. Схема включения датчика используется мостовая или трансформаторная.

В конструкциях малогабаритных индуктивных датчиков используются прецизионные направляющие качения, пневматические арретиры, точные механизмы предотвращения поворота измерительного стержня вокруг оси и другие принципиальные решения, повышающие точность и надежность измерений. Пример конструкции индуктивного датчика фирмы Tesa приведен на рис. 2.

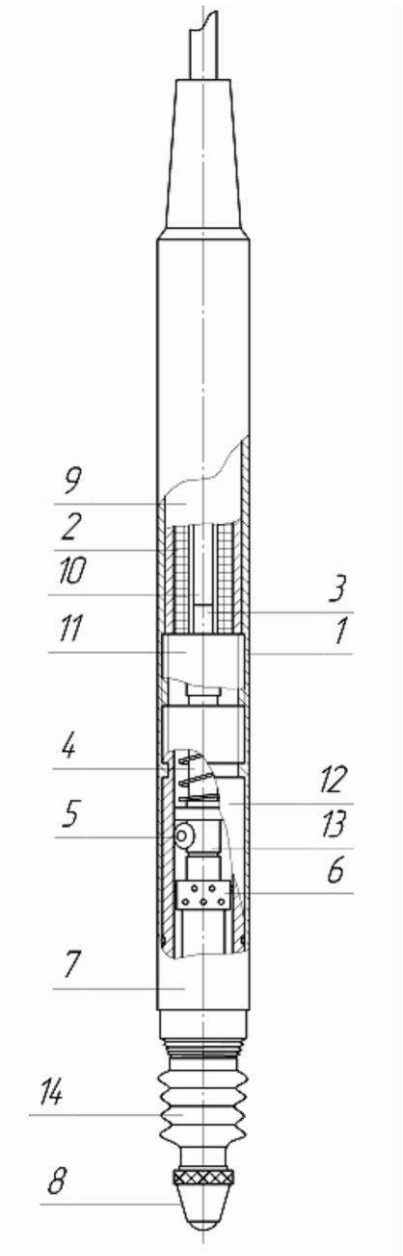


Рис. 2. Датчик Tesa

Конструкция датчика включает: корпус датчика 1; систему катушек 2; элемент, расположенный между ферромагнитным сердечником и измерительным стержнем, для корректировки различных коэффициентов теплового расширения 3; пружину, создающую измерительное усилие 4; направляющую, предотвращающую радиальное проворачивание измерительного стержня 5; шариковую обойму 6; ограничитель хода стержня 7; измерительный наконечник 8; промежуточную втулку в системе катушек 9; ферромагнитный сердечник 10; фиксатор пружины 11;, втулку направляющей подшипника качения 12; измерительный стержень 13; герметизирующее резиновое уплотнение 14.

TESA является ведущим разработчиком и производителем индуктивных датчиков более 40 лет. Ее индуктивные датчики обладают высокой точностью при использовании в производственной среде, где они могут применяться для технического контроля. Благодаря высокой точности датчики могут также использоваться в точных метрологических системах, например для калибровки.

Датчики Tesa имеют следующие особенности:

• Все электронные датчики имеют направляющие качения, за исключением аксиальных миниатюрных зондов.

• Шариковые направляющие практически не-

чувствительны к радиальным нагрузкам.

• Датчики эффективно защищены от проникновения твердых и жидких загрязнителей резиновыми уплотнениями.

• За счет герметизации используется простой вакуумный арретир измерительного стержня без механических устройств.

• Электронный измерительный сигнал имеет высокую повторяемость и малый гистерезис.

• Разрешение датчиков достигает 0,01 мкм.

1.2. Обзор библиографии по теории индуктивных измерительных преобразователей перемещений

Первые отечественные публикации по теории индуктивных измерительных преобразователей перемещения относятся к сороковым годам 19-го столетия. Это работы В.Н.Мильштейна [156], Е.И.Дмитриева [71] и Е.Г.Давыдова [67]. Первым крупным обобщением теории индуктивных измерительных преобразователей перемещений явилась диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук Л.Ф.Куликовского [134], защищенная в 1951 г., а также опубликованная им в 1961 г. монография [135]. Вопросы теории преобразователей наряду с теорией и вопросами расчета магнитных цепей различных электромеханических устройств рассматривались в фундаментальных трудах Б.С.Сотскова [219] (1950) г. и [218] (1965 г.). Эти же вопросы рассмотрены в монографиях Ф.А.Ступеля [225] (1958 г.), [226] (1965 г.); Л.Я.Цикермана и Р.Ю.Котляра [257] (1966 г.); М.Ф.Зарипова [79] (1969 г.), [85] (1976 г.); М.И.Белого [28] (1968 г.), [30] (1976 г.); Л.Ф.Куликовского и В.Г.Жирова [137] (1977 г.); М.П.Рашковича, П.М.Рашковича и Б.И.Шкловского [192] (1969 г.); Н.Е.Конюхова [139] (1971 г.), [118] (1977 г.); Л.А.Стрибнера [223] (1975 г.).

Отечественные промышленные индуктивные измерительные устройства для линейных измерений описаны в книгах С.А.Розентула [196] (1968 г.) и Ю.Д.Виноградова, В.М.Машинистова и С.А.Розентула [50] (1976 г.), а индуктивные преобразователи для различных измерений в книгах Д.И.Агейкина, Е.Н.Костиной и Н.Н.Кузнецовой [11] (1965 г.), А.М.Туричина [228] (1966 г.), Г.П.Нуберта [171] (1970 г.), в справочнике [93] (1980 г.) и ряде других. Вопросы применения индуктивных измерительных устройств для автоматизации технического контроля обсуждаются в работах Я.И.Бовсуновского [35] (1964 г.), Е.Ф.Шульца, И.Т.Речкалова и Ю.М.Фрейдлина [264] (1974 г.).

Выше перечислены публикации посвященные либо целиком, либо в основном, индуктивным измерительным преобразователям. Наряду с перечисленными имеется значительное число публикаций, в которых вопросы,

касающиеся индуктивных измерительных преобразователей, рассматриваются наряду с другими вопросами.

Научная теория первичных индуктивных измерительных преобразователей перемещений получила дальнейшее развитие в диссертациях на соискание ученой степени доктора технических наук М.Ф.Зарипова [80] (1969 г.), М.И.Белого [27] (1969 г.) и Н.Е.Конюхова [117] (1973 г.), а также в диссертациях на соискание ученой степени кандидата технических наук П.В.Новицкого [170] (1953 г.), В.С.Чамана [258] (1957 г.), А.А.Кольцова [114] (1958 г.), В.В.Морева [162] (1959 г.), И.И.Ясинскаса [268] (1959 г.), К.Д.Колесникова [113] (1960 г.), В.Я.Едуша [75] (1963 г.), Г.И.Передельского [176] (1968 г.), Ю.И.Сахарова [208] (1969 г.), Я.Р.Абдуллаева [2] (1969 г.), Е.Г.Саяпиной [210] (1969 г.), В.К.Аширова [23] (1970 г.), М.А.Ураксеева [232] (1970 г.), В.Г.Жирова [76] (1970 г.), П.Л.Глузмана [61] (1970 г.), В.С.Моисеева [160] (1970 г.), Р.Б.Дадашевой [68] (1972 г.), И.А.Лиманова [147] (1972 г.), Ю.А.Вострикова [52] (1972 г.), Н.Н.Рыбикова [202] (1972 г.), Э.У.Ибрагимова [89] (1972 г.), В.А.Кругликова [129] (1972 г.), Л.Б.Майстровского [152] (1972 г.), Л.А.Кондрашовой [116] (1973 г.), Т.А.Макарова [153] (1973 г.), В.Г.Никитина [166] (1973 г.), В.В.Ковалевского [110] (1974 г.), В.Б.Нерсесяна [164] (1974 г.), А.И.Савича [203] (1974 г.), А.Х.Семерджиева [211] (1974 г.), С.Ю.Курганбаевой [143] (1974 г.), Н.А.Богдановой [36] (1975 г.), И.Г.Фикс-Марголиной [252] (1975 г.), В.Л.Гераськова [57] (1975 г.), И.Ф.Попова [181] (1975 г.), Ш.А.Кадыровой [102] (1975 г.), М.Л.Нечаевского [165] (1975 г.), Г.Н.Кирюшина [106] (1976 г.), В.В.Черных [261] (1976 г.), А.И.Никонова [167] (1977 г.), Ю.П.Поцелуева [183] (1977 г.), Р.И.Утяшева [235] (1978 г.), Н.Н.Пашенцева [175] (1978 г.), Б.Я.Гринштейна [63] (1980 г.) и некоторых других диссертационных работ.

Библиографический список рассмотренных работ приведен в конце. На основе рассмотрения литературных источников составлена табл. П1, приведенная в приложении и содержащая краткую характеристику и основные результаты для каждой рассмотренной работы. При анализе литературных источников учитывался вид исследуемого индуктивного первичного преобразователя, примененные методы теории магнитных цепей и электромагнитных полей, полнота аналитического описания метрологических характеристик преобразователя (метрологическая модель преобразователя), полнота и метрологическая обоснованность методики расчета преобразователя, вопросы использования ЭВМ для исследования и расчета преобразователя, а также ряд других особенностей. В таблице отражены те работы, в которых вопросы исследования первичных индуктивных измерительных преобразователей представлены наиболее полно. При этом приведены только конечные результаты и аналитические выражения, решенные относительно тех или иных метрологических

характеристик преобразователя. В ряде случаев не приводятся, имеющиеся в работах, выражения для метрологических характеристик, не являющимися специфическими именно для индуктивных преобразователей.

Табл. П1 позволяет оценить современное состояние теории индуктивных первичных измерительных преобразователей и степень полноты, разработанных для них аналитических метрологических моделей. Рассмотрение табл. П1 показывает существенно различную степень полноты разработки теории индуктивных преобразователей разных видов. Обобщенные результаты библиографического обзора приведены в табл. П2, которая составлена в результате обработки данных табл. П1. Табл. П2 позволяет оценить общий подход того или иного исследователя к описанию преобразователя, полноту предлагаемого описания и особенности этого описания. Эту таблицу целесообразно использовать для предварительного анализа работ, переходя к табл. П1, в случае необходимости получения более подробных данных по конкретной работе.

1.3. Анализ библиографических источников

В соответствии с определениями авторов рассматриваемых работ все исследованные преобразователи можно разделить на 14 типов:

- преобразователи с переменной длиной немагнитного зазора,
- с переменной площадью потока в немагнитном зазоре,
- соленоидные преобразователи,
- преобразователи с распределенными электромагнитными параметрами,
- магнитомодуляционные преобразователи,
- функциональные преобразователи,
- преобразователи с плоской подвижной измерительной обмоткой,
- преобразователи с подвижной обмоткой,
- преобразователи с подвижным экраном,
- преобразователи с постоянными магнитами,
- преобразователи на принципе индукционной подвески,
- делительные преобразователи,
- трансформаторные преобразователи,
- преобразователи с зубчатым якорем.

При этом преобразователи с переменным зазором рассмотрены в 47% работ, трансформаторные преобразователи в 27%, а, например, преобразователи с переменной площадью исследуются только в одной работе.

Характерным является и то обстоятельство, что для каждого типа преобразователя разрабатывается, как правило, своя собственная теория, что порождает

различие методов исследования различных типов индуктивных преобразователей, различие их математических моделей и, как следствие, различные подходы при расчете преобразователя.

Существенно отличается в разных работах и полнота аналитического описания метрологических характеристик преобразователя. Так в 89% работ находится аналитическое выражение градуировочной характеристики преобразователя, в 53% - выражение для чувствительности преобразователя, в 22% - выражение нелинейности характеристики, в 11% - выражение для погрешности от нелинейности характеристики, в 3% - выражение для предела измерения преобразователя, а, например, выражение для диапазона измерения преобразователя не приводится ни в одной из рассмотренных работ. При этом только в 17% рассмотренных работ метрологические характеристики преобразователя выражаются авторами непосредственно через конструктивные размеры и параметры магнитопровода, однако приводимые при этом зависимости, как правило, чрезвычайно упрощены и учитывают лишь ограниченное число конструктивных параметров преобразователя. Последнее обстоятельство не позволяет непосредственно использовать приводимую аналитическую модель преобразователя для его анализа или расчета. С точки зрения наибольшей полноты построения аналитической метрологической модели преобразователя необходимо выделить работы Л.Ф. Куликовского, М.Ф. Зарипова, М.И. Белого, И.А. Лиманова, В.Б. Нерсесяна, В.В. Черных [27, 28, 79, 80, 134, 135, 147, 164, 261].

Наиболее разработанной является теория преобразователей с распределенными параметрами. Эта проблема решается в диссертациях на соискание ученой степени доктора технических наук М.Ф. Зарипова, М.И. Белого, Н.Е. Конюхова [27, 80, 117] и в ряде диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук [36, 129, 143,164, 183, 232, 235, 252, 261], а также в монографиях [28, 30, 79, 85, 118, 135, 137, 139, 190]. Однако, практическое применение измерительных преобразователей с распределенными параметрами для измерения перемещений ограничено.

Теория преобразователей других типов разработана менее полно, их аналитические описания учитывают меньшее число влияющих факторов и в большинстве своем значительно упрощены. Сказанное необходимо отнести и к преобразователям с переменной длиной немагнитного зазора, несмотря на то, что этому типу преобразователей посвящено наибольшее число работ, что было показано выше.

В анализируемых работах индуктивный измерительный преобразователь рассматривается в качестве частного случая магнитной цепи и для его исследования применяются те или иные методы исследования магнитных цепей.

Практически во всех работах применяются методы магнитостатики, которые только в отдельных случаях дополняются учетом динамики магнитного потока путем учета поверхностного эффекта [110, 171, 228, 257] или путем расчета магнитного сопротивления цепи через удельные магнитные сопротивления материала, полученные при намагничивании материала переменным полем [80, 116, 170, 192, 211, 252]. Следует отметить, что впервые предложение учитывать переменный характер магнитного потока в магнитопроводе преобразователя через удельные магнитные сопротивления (активное и реактивное) материала, определенные при перемагничивании материала переменным полем было сформулировано П.В. Новицким [170]. При использовании методов магнитостатики в 78% работ авторы прибегают к использованию законов Кирхгофа для магнитной цепи и первого уравнения Максвелла. В 8% работ используются элементы теории поля и, в частности, понятие магнитного потенциала поля. В остальных работах исследование ведется с использованием методов теории электрических цепей или формул для магнитного потока в магнитной цепи с малыми немагнитными зазорами, что, естественно, значительно ограничивает возможности исследования.

При исследовании магнитопровода преобразователя авторы считают сопротивление ферромагнитных участков постоянным и независящим от измеряемого перемещения. При этом в отдельных работах делается попытка учета размагничивающего фактора сердечника через коэффициент размагничивания [110, 160, 202].

Все авторы признают важность и существенную сложность точного учета магнитного потока в немагнитном зазоре. Этот вопрос исследуется в 36% анализируемых работ. Характер потока в зазоре оценивается либо экспериментально [134, 135, 218, 219], либо графическим построением картины поля [116, 164, 218, 219], либо электрическим моделированием [57, 76], либо использованием метода “вероятных путей потока” Г. Ротерса [192, 203, 211, 225, 226], либо, наконец, использованием метода Б.К. Буля [27, 28, 79, 80, 116, 117, 118, 139, 153, 192, 223]. Необходимо отметить, что в ряде случаев авторы ограничиваются рекомендацией какого-либо метода без проведения соответствующего анализа с его использованием. Применение перечисленных методов рассматривается как самостоятельный этап графоаналитического анализа или расчета индуктивного измерительного преобразователя и не завершается построением чисто аналитической модели поля в немагнитных зазорах магнитопровода преобразователя, что, в свою очередь, препятствует построению аналитической математической модели преобразователя.

Уже в ранних работах по индуктивным измерительным преобразователям высказывается предположение о существенном влиянии на характеристику

преобразователя нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного сердечника и расчет преобразователя предлагается производить графоаналитическим методом с использованием кривой намагничивания материала магнитопровода [134, 135, 218, 219, 257], то есть с использованием методов расчета магнитных цепей при учете магнитного сопротивления магнитных участков. Впервые детально этот вопрос с точки зрения характеристики преобразователя исследован в работах М.Ф. Зарипова [80] и М.И. Белого [27]. Нелинейность характеристики намагничивания материала магнитопровода принимается во внимание в 22% рассмотренных работ. Кроме уже названных работ указанное обстоятельство учитывается в работах [30, 36, 139, 164, 166, 252]. Помимо графоаналитического метода учета нелинейности характеристики намагничивания в более поздних работах получил распространение метод аппроксимации характеристики намагничивания различными аналитическими выражениями, в частности, кубическими сплайнами [27, 28, 117, 139, 158, 164, 166, 252, 254].

В подавляющем большинстве анализируемых работ конечной целью исследования является вывод выражения для градуировочной характеристики индуктивного преобразователя. В более редких случаях на основе полученного выражения градуировочной характеристики исследуются чувствительность преобразователя и нелинейность характеристики (погрешность от нелинейности). При этом наблюдается различный подход к выбору выходного параметра преобразователя: в 50% работ в качестве выходного параметра принимается индуктивность обмотки преобразователя, в 53% - измерительное напряжение схемы включения (есть работы, в которых рассматриваются оба этих параметра). Иногда рассматривается полное сопротивление преобразователя, ток в нагрузке и т.д. Неоднозначность такого подхода приводит к различию применяемых методов анализа и к несопоставимости получаемых результатов.

Исследователи индуктивных измерительных преобразователей достаточно часто (около 20% рассматриваемых работ) указывают на необходимость применения ЭВМ при расчете и анализе преобразователей [19, 22, 51, 73, 100, 104, 145, 188, 241]. Однако, при этом ЭВМ используется для решения частных задач, возникающих в процессе расчета или анализа преобразователя: численное решение дифференциальных уравнений, описывающих распределение магнитного потока вдоль магнитной цепи; численная модель нелинейности кривой намагничивания или петли гистерезиса и т.д. Вопросы же метрологического моделирования преобразователя на ЭВМ в этих работах не рассматриваются.

Несмотря на большое число известных работ, посвященных теории индуктивных измерительных преобразователей, в их основе лежат одни и те же методы расчета магнитных цепей, предложенные и развитые В.К. Аркадьевым,

Г.К. Ротерсом, Б.С. Сотсковым, Б.К. Булем, М.А. Розенблатом и рядом других исследователей. Это методы графоаналитического расчета магнитных цепей с использованием характеристик намагничивания материала магнитопровода и картины поля вне ферромагнитных участков магнитной цепи (например, методом “вероятных путей” магнитного потока), применительно к случаю магнитостатической задачи.

Анализ основных работ в области теории индуктивных измерительных преобразователей позволяет сделать следующие выводы:

- Отсутствует единый подход к описанию индуктивных преобразователей разных типов. Для каждого типа преобразователей строятся собственные математические модели, которые, в свою очередь, различны у различных исследователей.
- Известные математические модели преобразователей в недостаточной степени отражают их метрологическую сущность, что не позволяет создать метрологическую математическую модель преобразователя для решения задач его синтеза, оптимизации и автоматизации проектирования.
- Задача математического описания индуктивного измерительного преобразователя рассматривается как частный случай приложения законов магнитостатики для описания магнитных цепей общего назначения.
- В основе теории индуктивных измерительных преобразователей лежат методы описания магнитных цепей В.К. Аркадьева, Г.К. Ротерса, Б.С. Сотскова, Б.К. Буля, М.А. Розенблата.
- Предлагаемые методы расчета индуктивных преобразователей разработаны применительно к частным случаям их конструкции, основываются на ряде экспериментальных характеристик и рекомендаций и не позволяют аналитическим путем определить комплекс метрологических характеристик определенной конструкции преобразователя и, тем более, синтезировать его конструкцию, исходя из метрологических требований к преобразователю.

2. Оценка математических моделей индуктивных измерительных преобразователей

2.1. Оценка эффективности приложения теории магнитных цепей к описанию метрологических характеристик индуктивного преобразователя

Конечной целью метрологического анализа индуктивного преобразователя является определение его основных метрологических характеристик при заданной конструкции. Задача метрологического синтеза индуктивного преобразователя может рассматриваться как задача определения конструктивных параметров преобразователя, исходя из заданных его метрологических характеристик. При рассмотрении метрологических аспектов теории индуктивных измерительных преобразователей, по сложившейся традиции в области измерительной техники, мы в дальнейшем считаем целесообразным использование понятия “датчик” (в нашем случае “индуктивный датчик”), включая в это понятие сочетание “чувствительного элемента” и “первичного индуктивного измерительного преобразователя”. Такое сочетание позволяет на базе индуктивного измерительного первичного преобразователя строить датчики различных физических величин: перемещение, давление, расход и т.д.

Нормируемые метрологические характеристики средств измерений устанавливаются стандартом ГОСТ 8.009-84. На основе этого стандарта, с учетом назначения индуктивного измерительного преобразователя, для характеристики последнего целесообразно использовать следующий комплекс метрологических характеристик: номинальная статическая характеристика преобразователя, характеристика погрешности преобразователя, входной и выходной импеданс преобразователя и динамическая характеристика преобразователя. Этот перечень следует дополнить характеристиками, определяемыми на основе номинальной статической характеристики и на практике используемыми вместо нее (в основном, в том случае, когда характеристика линейна): диапазон измерения преобразователя, пределы измерения преобразователя и коэффициент преобразования.

Ввиду того, что в известных работах отсутствует единое мнение относительно выходной величины преобразователя, используем следующие соображения. Поскольку такой преобразователь представляет собой переменную индуктивность, то его выходным параметром является полное сопротивление Z_L. Полное сопротивление преобразователя можно представить в виде реактивной X_L и активной R_L составляющих или в виде индуктивности L и добротности Q. Последние две величины удобны тем, что позволяют характе-

ризировать преобразователь в некотором диапазоне рабочих частот. В том случае, когда добротность преобразователя велика, в качестве его выходного параметра можно рассматривать только его индуктивность L.

Таким образом, статическую характеристику индуктивного преобразователя можно представить в виде

$Z_n=f(l)$ или $L_n=f(l)$,

где Z_n – полное сопротивление преобразователя, L_n – индуктивность преобразователя, l – входное перемещение.

Входной импеданс индуктивного преобразователя определяет реакцию входного сигнала на присоединение преобразователя к источнику входного сигнала. Для преобразователя перемещений в качестве этого параметра может быть принято измерительное усилие, причем спецификой индуктивного преобразователя является наличие электромагнитной составляющей измерительного усилия.

Выходной импеданс измерительного преобразователя определяет реакцию его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки. Для индуктивного преобразователя выходной импеданс определяется его полным сопротивлением или реактивным сопротивлением в случае большой добротности.

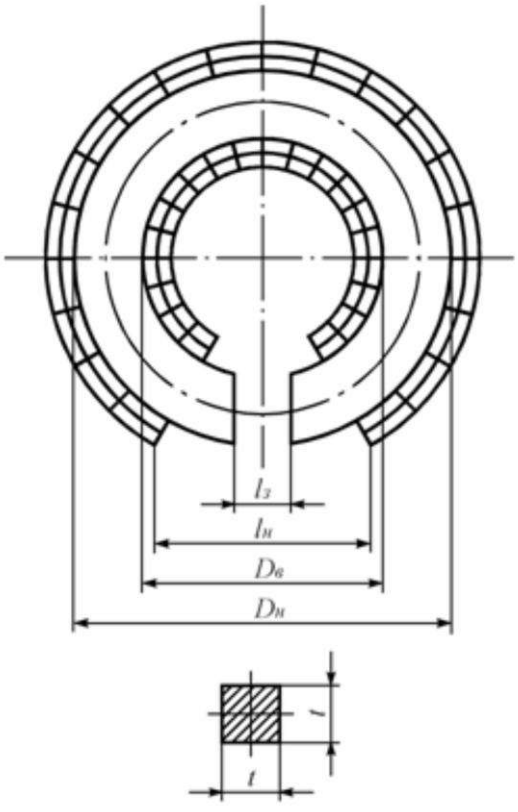


Рис. 3. Тороид с зазором

Выше было указано на то, что в основе теории индуктивных измерительных преобразователей лежит ограниченное число методов расчета магнитных цепей. На основе этих методов исследователи выводят более или менее полное выражение для градуировочной характеристики преобразователя и затем находят производные метрологические характеристики. Для оценки возможностей такого подхода рассмотрим в качестве примера простейший преобразователь в виде тороидальной катушки с сердечником, имеющим немагнитный зазор длиной $l_з$ (рис.3).

В качестве выходного параметра преобразователя примем индуктивность L его обмотки. Градуировочная характеристика преобразователя будет иметь вид $L=f(l_з)$.

Для расчета преобразователя используем методы Г.К. Ротерса [197], Б.С. Сотскова [219], Б.К. Буля [41] и Ю.С. Русина [200], являющиеся наиболее крупными обобщениями теории магнитных цепей.

Конкретные параметры исследуемого преобразователя: D_H = 40 мм, D_B = 36 мм, t = 2 мм, W = 1605 витков, l_H = 12 мм, материал сердечника – сталь. Характеристика намагничивания материала сердечника определена экспериментально в процессе исследования.

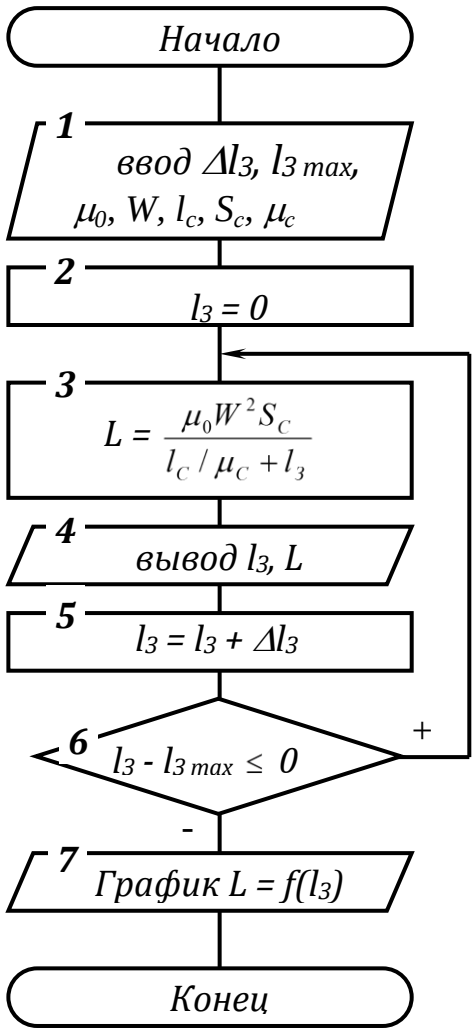


Рис. 4. Упрощенный расчет характеристики

Простейший расчет заключается в пренебрежении нелинейностью характеристики намагничивания магнитопровода и "выпучивания" магнитного поля в немагнитном зазоре. Как можно видеть из приведенного выше обзора этот способ получил распространение в значительном числе работ, посвященных исследованиям индуктивных измерительных преобразователей. Алгоритм расчета приведен на рис. 4. В результате расчета строится характеристика преобразователя в виде зависимости $L=f(l_з)$.

Методы Г.К. Ротерса, Б.С. Сотскова, Б.К. Буля и Ю.С. Русина учитывают нелинейность намагничивания материала магнитопровода путем графоаналитического расчета характеристики намагничивания конкретного сердечника. Принцип построения характеристики намагничивания во всех случаях одинаков. При использовании этих методов учитывается неоднородность поля в зазоре. Основой для учета неоднородности поля в зазоре является метод “вероятных путей потока”, использованный Г.К. Ротерсом, который в той или иной степени модернизируется и уточняется на основе экспериментальных данных Б.С. Сотсковым, Б.К. Булем, и Ю.С. Русиным. Общий алгоритм расчета показан на рис. 5. Отличие методов заключается в реализации подпрограммы определения проводимости немагнитного зазора (оператор 4). Как можно видеть из приведенного алгоритма расчет основан на целом ряде графических построений, что серьезно усложняет реализацию алгоритма на ЭВМ и делает невозможной эту реализацию без применения специальных средств.

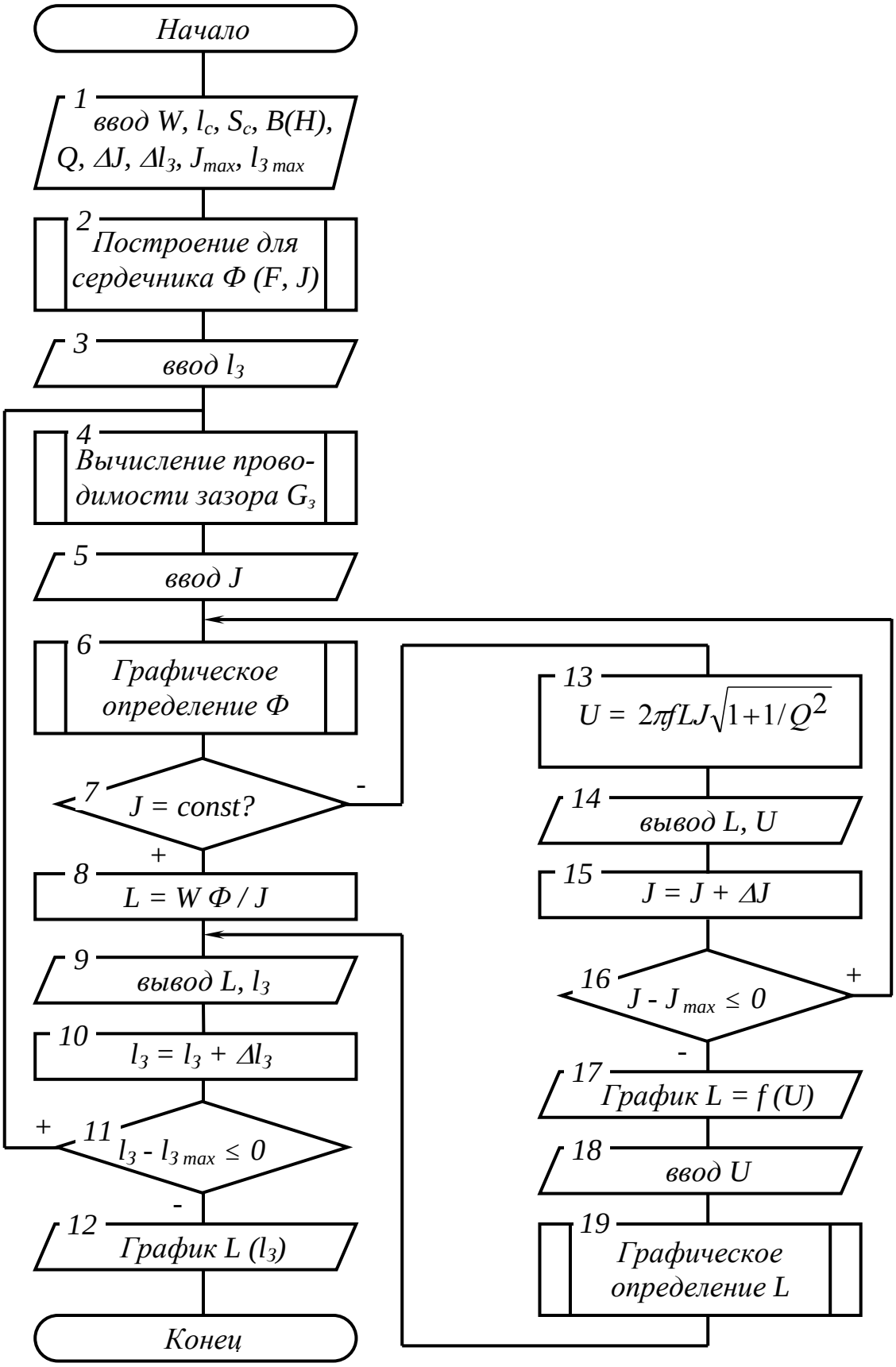


Рис. 5. Расчет с учетом поля в зазоре

Другой особенностью расчета является введение некоторого условного режима работы магнитопровода: постоянный ток в обмотке *I=Const* или постоянное напряжение на обмотке *U=Const*. На практике же переменными являются оба параметра.

Алгоритм построения характеристики намагничивания сердечника показан на рис. 6. Конечным его результатом является построение графика зависимости магнитного потока *Ф* в сердечнике (в ферромагнитных участках магнитопровода) от намагничивающей силы *F* или от тока *I* в обмотке.

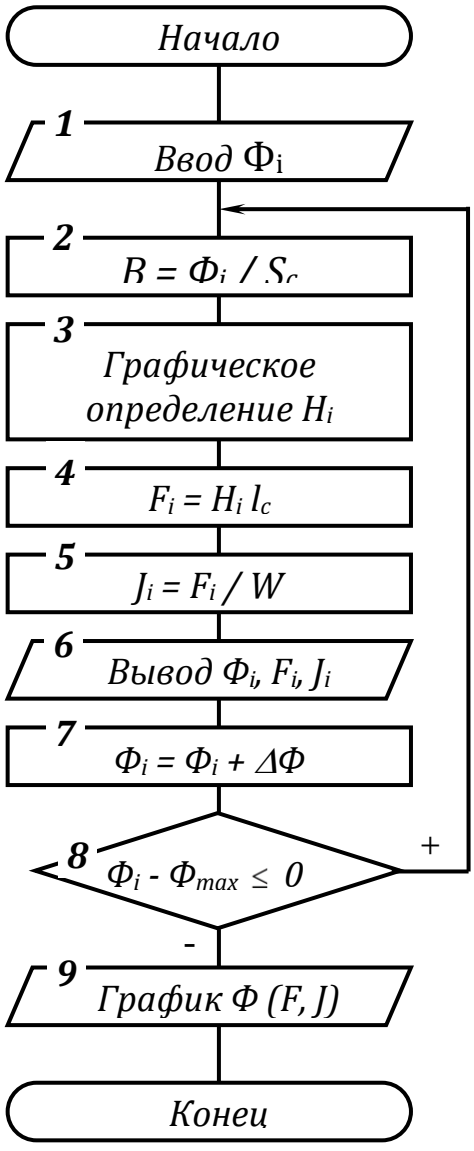


Рис. 6. Расчет характеристики намагничивания

Проводимость немагнитного зазора длиной $l_з$ может быть определена разными способами:

- без учета выпучивания магнитного поля в зазоре

$$G_З = \frac{\mu_0 S_З}{l_З};$$

- по методу Б.С. Сотскова для случая “полюс-полюс”

$$G_{ЗС} = \frac{\mu_0 (t + k l_З)^2}{l_З},$$

где $k = 0{,}5...1{,}5$ – экспериментальный коэффициент;

- по методу Г.К. Ротерса

$$G_{ЗР} = \mu_0 \frac{t^2}{l_З}\left[\begin{array}{l} 1 + 1{,}04\frac{l_З}{t} + \frac{4 l_З}{\pi t}\ln\left(1 + \frac{2z}{l_З}\right) + \\ + 0{,}308\frac{{l_З}^2}{t^2} + \frac{z l_З}{t^2} \end{array}\right];$$

где z – условный параметр, определяемый учитываемой длиной полюса сердечника, участвующей в образовании потока в зазоре;

- по методу Б.К. Буля

$$G_{ЗБ} = \mu_0 \frac{t^2}{l_З}\left[1 + \frac{l_З}{t}\left[0{,}52 + \frac{2}{\pi}\ln\left(1 + \frac{2z}{l_З}\right)\right]\right]^2;$$

- по методу Ю.С. Русина

$$G_{3Pц} = \mu_0 \frac{t^2}{l_3}\left[1 + \frac{1}{30}\frac{zl_3}{t^2}\left[\frac{4th(0{,}87\,t/z)}{l_3/z} + 41th(5{,}5t/z)\right] + \right.$$

$$\left. + \begin{vmatrix} \frac{4l_3}{\pi t}\ln(8z/l_3) & при \quad 0 \le l_3/z \le 0{,}6 \\ \frac{4l_3}{\pi t}(1{,}017 + 0{,}36\,l_3/z) & при \quad 0{,}6 < l_3/z \le 1{,}8 \end{vmatrix}\right]$$

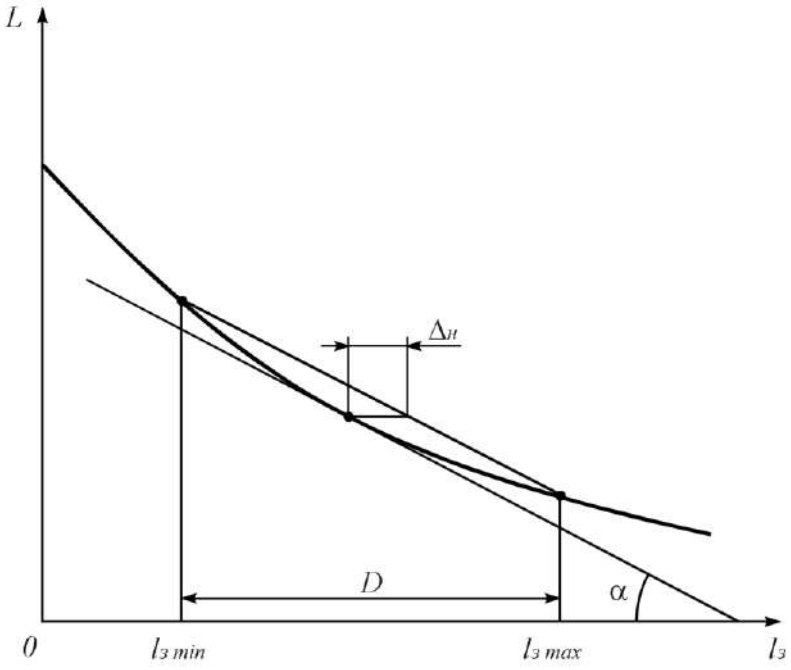


Рис. 7. Градуировочная характеристика преобразователя

После построения для сердечника характеристики *Ф(I)* и определения проводимости зазора, на графике *Ф(I)* строится характеристика намагничивания зазора и определяется величина потока *Ф* при заданном токе *I* в обмотке (оператор 6 на рис. 5). Завершаются расчеты построением номинальной статической характеристики преобразователя $L(l_3)$ для режима постоянного тока или постоянного напряжения. Характеристика определяется только графически и, следовательно, другие нормируемые метрологические характеристики преобразователя также могут быть определены только графически. На рис. 7 показано определение коэффициента преобразования, диапазона измерения и погрешности от нелинейности характеристики на основе номинальной статической характеристики преобразователя: диапазон измерения *D*; пределы измерения $l_{3\,min}$ и $l_{3\,max}$; коэффициент преобразования $S=arctg(\alpha)$; погрешность от нелинейности характеристики Δ_H, приведенная погрешность от нелинейности характеристики $\delta_H = \Delta_H/D$, относительный коэффициент преобразования $S_0 = S/L$.

Данные расчета метрологических характеристик описанного образца с использованием перечисленных методов сведены в табл. 2. Эти расчеты, в

частности, показывают значительную зависимость метрологических характеристик от режима питания катушки током и существенный разброс результатов, полученных разными методами. В то же время данные расчета во всех случаях свидетельствуют о работоспособности преобразователя при длине немагнитного зазора $l_3=1$ мм, поскольку относительная чувствительность преобразователя, полученная разными методами, колеблется в пределах от 14% до 66% на мм изменения зазора. Согласно расчету зависимость индуктивности катушки от длины немагнитного зазора l_3 наблюдается и при зазоре в 2 мм.

Практические измерения индуктивности преобразователя при изменении длины немагнитного зазора показали, что уже при $l_3 \geq 0{,}4$ мм не наблюдается изменение его индуктивности и коэффициент преобразования $S = 0$. Следовательно, преобразователь неприменим для измерений $l_3 \geq 0{,}4$ мм и приведенный расчет дает качественно неверный результат.

Таблица 2

Метод	**Условия**	S мГ/мм при зазоре $l_з$ =			S_0 мм$^{-1}$ при зазоре $l_з$ =			$\delta_Н$ % $0 \leq l_3 \leq 0{,}5$
		0,5 мм	1 мм	2 мм	0,5 мм	1 мм	2 мм	
Без учета выпучивания	I=14 мА	17,2	4,7	2,2	1,46	0,63	0,48	28
	I=50 мА	22,9	5,5	2,1	1,60	0,66	0,44	40
	U=0,1 В	18,1	5,6	2,5	1,28	0,66	0,50	24
Б.С. Сотсков	I=14 мА	8,5	2,7	0,29	0,53	0,20	0,02	30
	I=50 мА	18,3	3,1	0,53	0,85	0,18	0,03	40
	U=0,1 В	10,9	3,1	0,27	0,57	0,19	0,02	28
Г.К. Ротерс	I=14 мА	7,2	3,2	1,9	0,37	0,19	0,12	38
	I=50 мА	17,9	4,8	2,5	0,63	0,21	0,12	40
	U=0,1 В	7,0	4,4	1,2	0,30	0,22	0,07	34
Б.К. Буль	I=14 мА	5,8	2,0	1,4	0,31	0,12	0,09	34
	I=50 мА	13,0	4,2	2,3	0,47	0,18	0,11	40
	U=0,1 В	7,0	3,8	1,4	0,31	0,19	0,07	34
Ю.С. Русин	I=14 мА	9,9	2,5	1,6	0,49	0,14	0,10	30
	I=50 мА	12,9	6,3	3,2	0,42	0,24	0,15	38
	U=0,1 В	6,6	3,8	1,8	0,27	0,17	0,09	29

Таким образом существующие методы расчета индуктивностей с ферромагнитными сердечниками приводят к значительным погрешностям в случае использования их для определения метрологических характеристик индуктивного измерительного преобразователя, что приводит к необходимости поиска более объективной математической модели индуктивного преобразователя. С целью оценки возможного подхода к составлению такой модели рассмотрим магнитопровод индуктивного датчика, выполненный с немагнитным зазором.

Рассматриваемую кольцевую магнитную цепь с зазором при увеличении длины немагнитного зазора $l_З \to \infty$ можно представить в виде прямоугольного стержня с длиной l_C (рис. 8). Для разомкнутого магнитопровода (рис. 8, б) магнитный поток зависит от эффективной магнитной проницаемости, которая будет меньше магнитной проницаемости материала магнитопровода, вследствие проявления размагничивающего фактора

$$\mu_{ЭР} = \frac{\mu_C}{1 + N_P(\mu_C - 1)},$$

где, μ_C - магнитная проницаемость материала сердечника, N_P – коэффициент размагничивания данной формы сердечника.

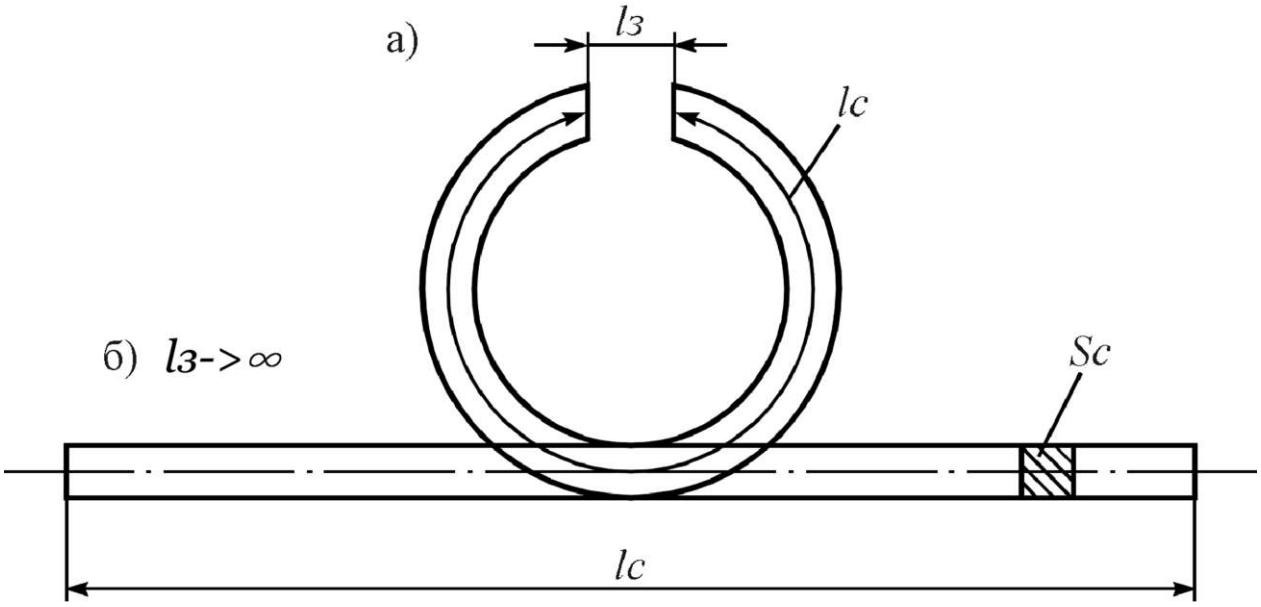


Рис. 8. Размыкание сердечника

Для исходной кольцевой магнитной цепи с зазором (рис. 8, а) при пренебрежении потоком рассеяния и однородности магнитного поля как в сердечнике, так и в зазоре можно записать

$H_i = H_e - H_o$,

где H_i, H_e, H_o – напряженности внутреннего, внешнего и размагничивающего полей, соответственно.

В первом приближении примем $H_o = Const$, тогда

$$\mathrm{H_o} \approx \frac{\Phi l_З}{\mu_0 S_З l_C},$$

где Φ – магнитный поток в магнитной цепи, $S_З$ – площадь поперечного сечения магнитного потока в зазоре. С учетом последнего выражения представим

$$\frac{\Phi}{\mu_\mathrm{C} S_C} = \frac{\Phi}{\mu_Э S_C} - \frac{\Phi l_З}{\mu_0 S_З l_C},$$

откуда можно получить

$$\mu_Э = \frac{\mu_C}{1 + \dfrac{\mu_C l_З S_C}{\mu_0 l_c S_З}},$$

где $\mu_э$ - эффективная магнитная проницаемость магнитопровода с зазором, μ_C - магнитная проницаемость материала магнитопровода.

Эффективная магнитная проницаемость магнитопровода с зазором уменьшается по мере увеличения длины зазора вследствие увеличения влияния размагничивающего поля. При этом коэффициент размагничивания магнитопровода с зазором

$$N_З = \frac{l_З S_C}{l_c S_З}.$$

Предельное значение коэффициента $N_З$ магнитопровода с зазором при $l_З \to \infty$

$\lim\limits_{l_З \to \infty} N_P = N_P$, следовательно, $N_З = \dfrac{l_З S_C}{l_c S_З} \le N_P$,

откуда для рассматриваемой магнитной цепи предельное значение длины $l_З$ немагнитного зазора, которое может рассматриваться как верхний предел измерения

$$[l_З]_{\max} \le l_C N_P \frac{S_З}{S_C}.$$

Если использовать полученное выражение для магнитной цепи, рассмотренной в приведенном выше примере, то расчетное значение $[l_З]_{\max} = 0{,}37$ мм, что весьма близко к экспериментальному значению.

Таким образом, учет размагничивающего фактора магнитной цепи преобразователя позволяет получить для него качественно новые выводы, в частности, решить вопрос о пределе измерения такого преобразователя путем исследования геометрии его магнитопровода. Описание преобразователя с учетом размагничивающего фактора получается в принципе более точным, поскольку объективнее отражает физические процессы, происходящие в нем, и реализация такого подхода позволит, в конечном итоге, создать более совершенную математическую модель, описывающую метрологические свойства преобразователя.

Реализация предлагаемого подхода, однако, требует разработки элементов теории магнитных цепей с переменным фактором размагничивания применительно к магнитопроводам индуктивных измерительных преобразователей, что представляет собой сложную теоретическую задачу. В настоящее время известно ограниченное число исследовательских работ, посвященных исследованию

коэффициента размагничивания частных случаев магнитной цепи, из которых наиболее существенными являются [12, 14, 16, 17, 47, 48, 107, 111, 177, 194, 195, 221, 236, 237, 266, 267]. В то же время не исследован этот вопрос применительно к индуктивным преобразователям.

Другой проблемой, препятствующей созданию аналитической метрологической модели индуктивного преобразователя, является отсутствие аналитической модели магнитного поля вне ферромагнитных участков магнитопровода. Как мы видели выше, в фундаментальных исследованиях, посвященных теории магнитных цепей, авторы для описания магнитного потока вне ферромагнитных участков прибегают либо к методу "вероятных путей потока", либо к построению картины поля теми или иными графоаналитическими или численными методами. Отсутствуют работы, исследующие требования к точности описания поля вне ферромагнитных участков, исходя из точности описания метрологических характеристик преобразователя.

2.2. Классификация индуктивных измерительных преобразователей с учетом особенностей их математических моделей

Известно значительное число различных классификационных схем индуктивных измерительных преобразователей. Как уже указывалось выше при рассмотрении диссертационных работ по индуктивным измерительным преобразователям, авторы этих работ называют 14 типов преобразователей и посвящают свои работы исследованию конкретного типа преобразователя. В то же время значительно число работ с представлением развернутых классификацией индуктивных преобразователей. Такие классификационные схемы рассмотрены у Е.И. Дмитриева [71], Л.Ф. Куликовского [134, 135, 138], Б.С. Сотскова [218, 219], М.Ф. Зарипова [79, 80, 85], приведены в работах [11, 28, 30, 93, 109, 171, 185, 189, 192, 223, 225, 226, 228, 257, 265], а также в целом ряде других работ, ссылки на которые, в частности, делались выше.

В основу классификационных схем, в зависимости от целей авторов работ, положены разные принципы. Широко распространен конструктивный признак классификации. В ряде случаев в основе классификации лежат схемные признаки. Применяется классификация по виду входного параметра преобразователя, по характеру взаимодействия элементов преобразователя и ряд других признаков.

Наличие многочисленных классификаций, с одной стороны, свидетельствует об отсутствии единого подхода к теории индуктивных измерительных преобразователей, с другой, приводит к разнообразию их математических моделей, что усложняет задачу унификации и оптимизации преобразователей. В результате возникает также и различие применяемой терминологии. Так преоб-

разователь, выполненный в виде катушки индуктивности с ферромагнитным магнитопроводом, зазор в котором изменяется под действием измеряемого параметра определяется как: дроссельный преобразователь [156, 223, 257, 293], одинарный индуктивный преобразователь [225, 226, 277], индуктивный преобразователь [110, 192, 203].

Наблюдается смешивание понятий индуктивный и индукционный преобразователь [116]. Преобразователи имеющие две взаимосвязанные катушки в ряде работ относятся к трансформаторным преобразователям [52, 117, 134, 135, 164, 257], а в других работах определяются как взаимоиндуктивные [265].

Отсутствует общепринятое определение преобразователя, выполненного в виде катушки, в которой перемещается разомкнутый ферромагнитный сердечник. Такие преобразователи классифицируют как: соленоидные преобразователи [160, 202, 211, 228], трансформаторные преобразователи [52, 218, 219], преобразователи с дифференциальной дроссельной системой [277], преобразователи с проходным подвижным якорем [171, 257, 294], преобразователи с протяженным якорем [281, 282]. Неопределенность классификации названного преобразователя, в частности, порождает применение к его анализу метода “вероятных путей магнитного потока”, который для разомкнутого сердечника не дает удовлетворительных результатов [24].

Наиболее общий подход к классификации индуктивных измерительных преобразователей содержится в работах по преобразовательным элементам измерительной техники. Рассмотрим ряд примеров современных классификаций.

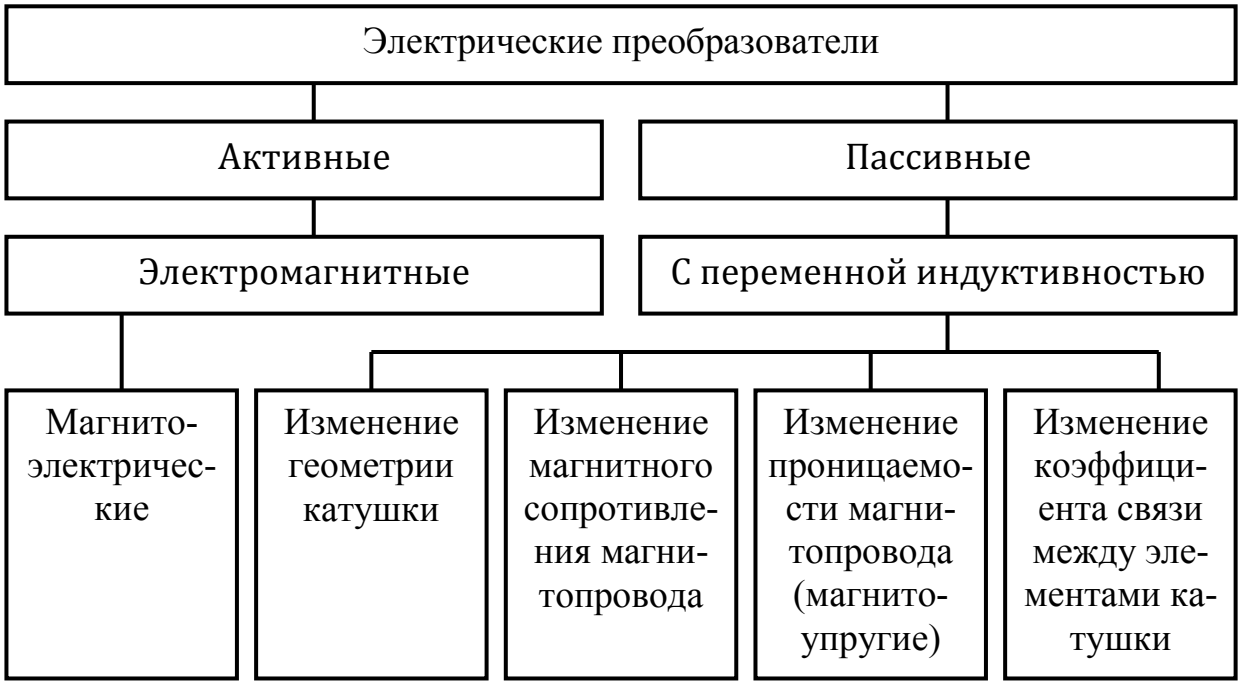


Рис. 9. Классификация Нуберта Г.П.

На рис. 9 представлена классификационная схема, составленная на основе сведений, приводимых в [171]; соответственно: на рис. 10 – в [265]; на рис. 11 – в [185]; на рис. 12 – в [93]. Во всех классификациях индуктивные измерительные преобразователи рассматриваются как частный случай электромагнитных или электрических преобразователей. Наиболее узко индуктивные преобразователи трактуются в работах [185,265]. В работах [93,171] индуктивные преобразователи представлены обширнее.

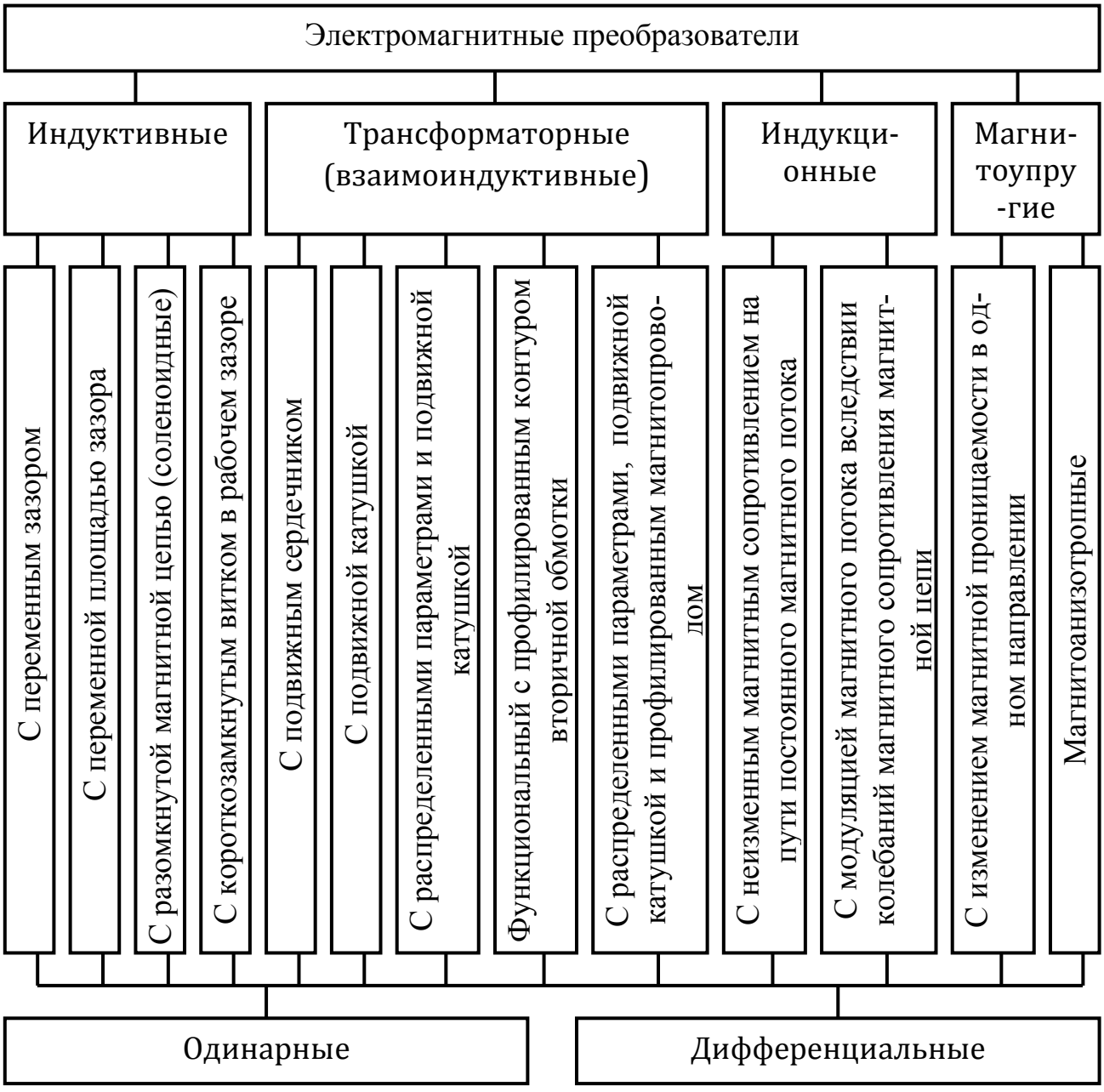


Рис. 10. Классификация электромагнитных преобразователей

В то же время содержание понятия “электромагнитные преобразователи” в работе [171] существенно расходится с его содержанием в работах [185, 265], в [93] понятие “электромагнитный преобразователь” не используется.

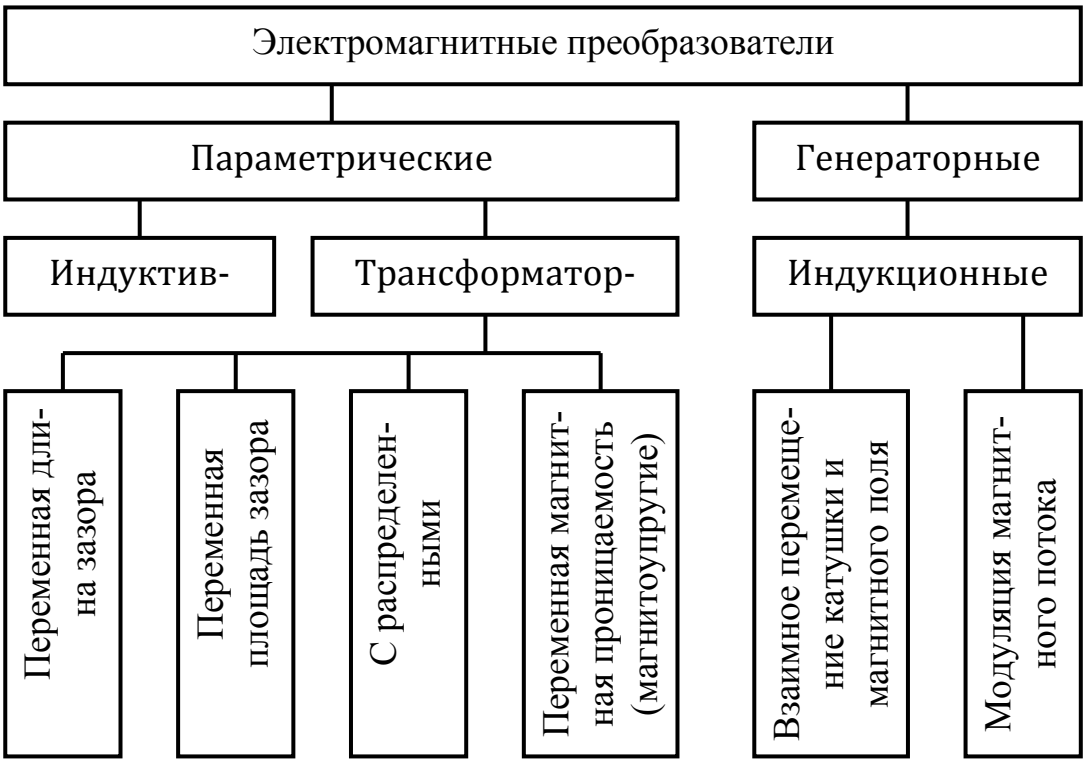


Рис. 11. Альтернативная классификация электромагнитных преобразователей

При классификации, на наш взгляд, целесообразно учесть следующие соображения. Рассматриваемый класс измерительных преобразователей основан на использовании физических свойств электромагнитного поля. При этом, связь между электрическим током и магнитным потоком определяется физическим элементом – индуктивностью (катушкой индуктивности)

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt}(LI)$$

где ψ - потокосцепление, создаваемое током I, L – индуктивность контура протекания тока I.

Названное обстоятельство справедливо как для “пассивных” преобразователей, когда магнитное поле создается током, протекающим через проводники, образующие индуктивность, так и для “активных” преобразователей, когда в проводниках, движущихся в магнитном поле, наводится Э. Д. С.

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -W\frac{d\Phi}{dt},$$

где W – число витков контура, охватывающих магнитный поток Φ.

В этом случае, как и в предыдущем, непременным физическим элементом, реализующим связь между электрическим и магнитным полем (для измерительного преобразователя) будет катушка индуктивности (или электрические проводники, обладающие индуктивностью).

Основываясь на высказанных соображениях определение “индуктивный преобразователь” допустимо применять в широком понимании к классу преобразователей, основанных на использовании свойств электромагнитного поля и физически реализуемых с применением катушки индуктивности. В данной ра-

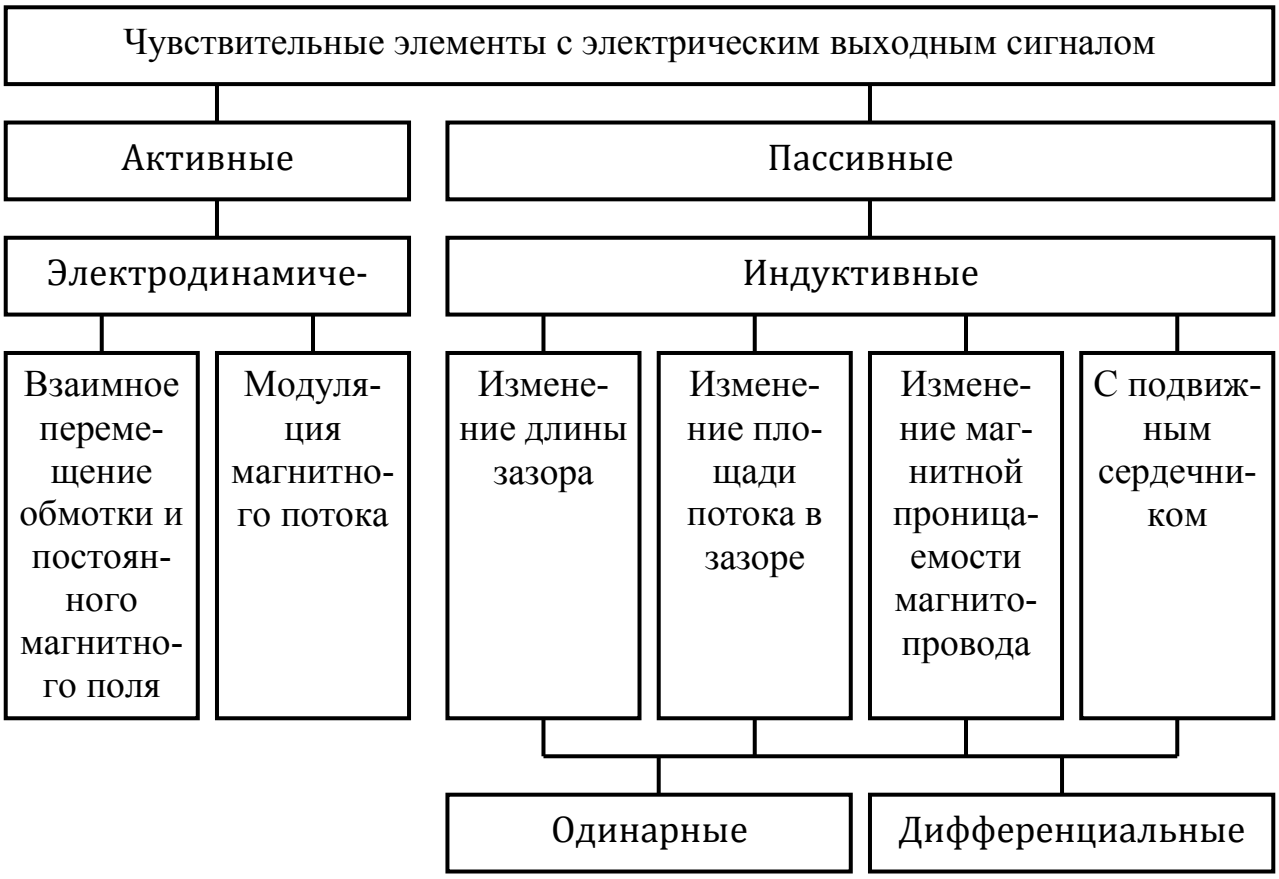


Рис. 12. Классификация электрических измерительных преобразователей

боте используется именно это содержание термина “индуктивный преобразователь”.

В [185,265] наряду с индуктивными преобразователями рассматриваются трансформаторные преобразователи, в [93,265] выделены одинарные и дифференциальные преобразователи (в рассматриваемых примерах работ [185] и [171] дифференциальные преобразователи также называются). Рассмотрим подробнее это обстоятельство.

На рис. 13 приведены варианты распространенного типа индуктивного преобразователя с переменным зазором. Такой преобразователь имеет катушку индуктивности на магнитопроводе, форма которого близка к замкнутой магнитной цепи. Длина немагнитного зазора в магнитопроводе переменна и ее изменение вызывает изменение магнитного сопротивления магнитопровода.

Преобразователь может быть выполнен по одинарной схеме (рис. 13, а), по трансформаторной схеме (рис. 13, б), по дифференциальной схеме (рис. 13, в) и

по дифференциально-трансформаторной схеме (рис. 13, г). В одинарной схеме изменение магнитного потока вызывает изменение индуктивности и полного сопротивления катушки

$$L = \frac{d\psi}{dt} = W\frac{d\Phi}{dI},\ \dot{Z} = R_L + j\omega L,$$

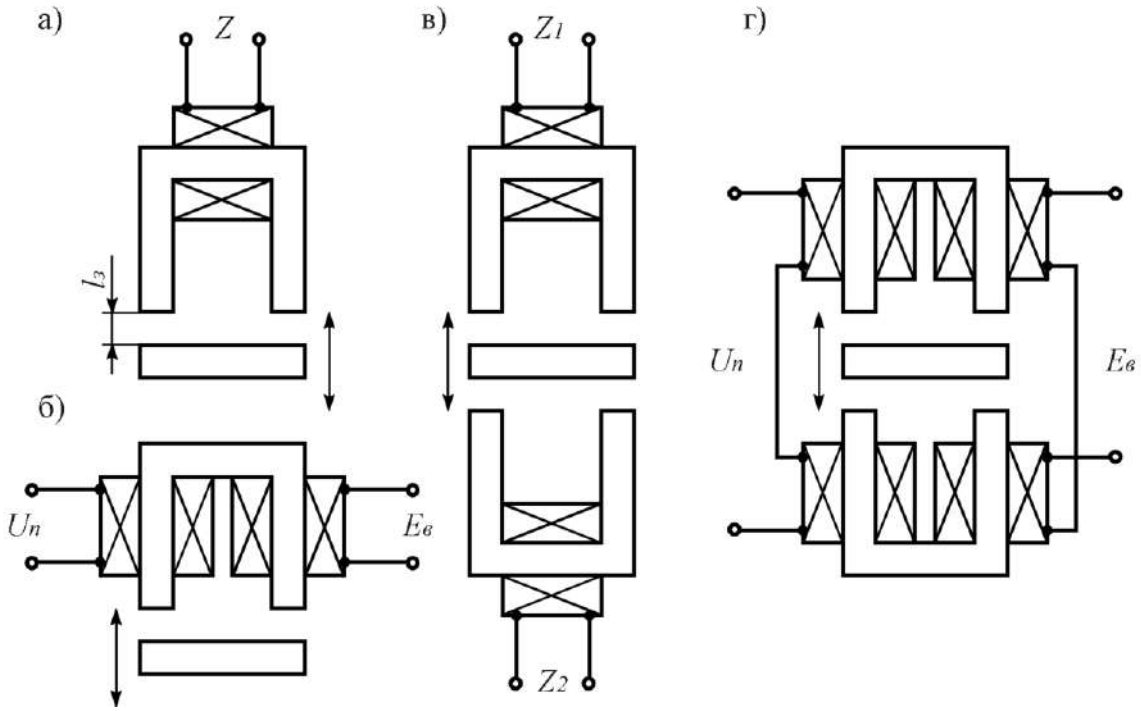


Рис. 13. Преобразователи с переменным зазором

где ψ, Φ – потокосцепление и магнитный поток катушки, W – число витков катушки, I – ток в катушке, R_L – эквивалентное активное сопротивление катушки, ω - круговая частота тока.

Основная задача теории такого преобразователя – определение магнитного потока в магнитопроводе и его связи с входным измерительным сигналом.

В трансформаторной схеме выходным сигналом является трансформаторная Э. Д. С. E_B, индуцированная во вторичной обмотке переменным магнитным потоком в магнитопроводе, создаваемым за счет питания обмотки возбуждения переменным напряжением $U_П$. Для трансформатора справедливо [33]

$$\dot{U}_B = -j\omega I_1 M,\ M = \frac{d\psi_{12}}{dI_1},$$

где I_1 – ток в обмотке возбуждения, M – взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток, ψ_{12} – потокосцепление вторичной обмотки, вызванное током в первичной обмотке.

Таким образом полной характеристикой трансформаторного преобразователя будет величина взаимной индуктивности M его обмоток, определение которой сводится к определению магнитного потока в магнитопроводе. Следовательно, в принципе трансформаторный преобразователь может быть назван взаимоиндуктивным.

С точки же зрения выходного параметра преобразователя понятия “трансформаторный” и “взаимоиндуктивный” следует различать, поскольку для трансформаторного преобразователя выходным параметром является выходная электродвижущая сила (Э.Д.С.), а для взаимоиндуктивного преобразователя – полное сопротивление системы соединенных обмоток, определяемое собственной индуктивностью и взаимной индуктивностью этих обмоток. С точки же зрения электромагнитной теории одинарный и трансформаторный преобразователь (рис. 13, в) состоит их двух одинаковых одинарных индуктивных преобразователей, а его выходной параметр

$$\Delta\dot{Z} = \dot{Z}_1 - \dot{Z}_2,$$

следовательно, основой для него также является теория одинарного индуктивного преобразователя. Аналогичный вывод следует и для дифференциально-трансформаторного преобразователя (рис. 13, г), поскольку для него справедливо

$$\dot{E}_B = \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{B1}.$$

Дифференциальная схема построения измерительного преобразователя не является специфической особенностью индуктивных измерительных преобразователей и используется для преобразователей с различной физической природой. Метрологические характеристики дифференциального преобразователя могут быть найдены на основе описания входящего в него одинарного преобразователя с использованием обобщенной теории дифференциального метода измерений.

Таким образом с точки зрения приложения элементов электромагнитной теории к построению математической модели индуктивного преобразователя основной будет являться одинарная схема индуктивного преобразователя, независимо от особенностей его классификационного определения.

В последнее время в отечественной литературе по индуктивным измерительным преобразователям выделены в качестве отдельного вида “преобразователи с распределенными электромагнитными параметрами”. Впервые конструктивную схему такого преобразователя рассмотрел Л.Ф. Куликовский, который классифицировал преобразователь, как преобразователь весьма больших линейных перемещений [135].

Подробная классификация преобразователей с распределенными параметрами и их теория разработаны в трудах М.Ф. Зарипова [79, 80, 85, 138], М.И. Белого [27, 28, 30], Н.Е. Конюхова [117, 118]. Особенностью преобразователя является использование эффекта изменения магнитного потока вдоль магнитной цепи. Учет последнего обстоятельства в теории преобразователя приводит к описанию закона распределения магнитного потока в магнитной цепи с помощью дифференциальных уравнений.

Строго говоря, в любой магнитной цепи электромагнитные ее параметры распределены вдоль цепи. Дифференциальные уравнения потока в цепи с учетом распределенности ее параметров по длине приводятся уже в работах Б.С. Сотскова [219] или в еще более ранней работе Н.А. Лившица [149]. Тем не менее фактор распределенности электромагнитных параметров вдоль магнитной цепи целесообразно учитывать только для таких преобразователей при построении их математической модели, для которых это явление используется как основа для преобразования измерительного сигнала. Следовательно, с точки зрения математического описания “преобразователи с распределенными параметрами” обособленны, хотя само название нельзя признать удачным.

Подводя итоги рассмотрению классификаций индуктивных измерительных преобразователей следует указать на то, что существующие классификации индуктивных измерительных преобразователей, в первую очередь, ориентированы на особенности конструкции преобразователя, его метрологические и эксплуатационные возможности, на область применения и в слабой мере учитывают особенности математической модели преобразователя или элементы электромагнитной теории, на основе которых могут быть построены такие модели. Рассмотрим вопрос классификации индуктивных преобразователей исходя из особенностей их математического описания.

Катушка индуктивности может питаться током, возбуждая в окружающем пространстве магнитное поля. Изменение магнитного потока катушки при этом приводит к изменению таких ее параметров, как индуктивность и полное сопротивление. Следовательно, в этом случае индуктивный преобразователь будет параметрическим.

Катушка может находиться в магнитном поле, создаваемом внешним источником. В этом случае перемещение катушки относительно поля или модуляция поля приведет к появлению Э.Д.С., индуктированной в катушке. В таком преобразователе используется явление электромагнитной индукции и преобразователь является индукционным.

Для локализации магнитного поля в пространстве в большинстве преобразователей используется магнитопровод. Магнитопровод может иметь форму близкую к замкнутой (или замкнутую) и разомкнутую. В первом случае изме-

нение параметров катушки происходит вследствии изменения магнитного сопротивления магнитопровода путем изменения его электромагнитных свойств (магнитной проницаемости и удельной электропроводности) или путем изменения геометрии магнитопровода. При этом естественным входным сигналом для преобразователя является либо изменение механических напряжений в материале магнитопровода, либо взаимное перемещение частей магнитопровода.

Во втором случае параметры катушки изменяются за счет перераспределения магнитного потока в пространстве и изменения его вследствие взаимного перемещения катушки и сердечника.

Катушка индуктивности может взаимодействовать через электромагнитное поле непосредственно с изделием, параметры или перемещения которого измеряются. Влияние изделия на параметры катушки во многом аналогично влиянию магнитопровода, но теория вопроса усложняется, поскольку в данном случае распределение магнитного поля в пространстве будет нестабильным, вследствии колебания электромагнитных свойств и размеров изделия, а также вследствии того, что основную энергию будет нести магнитное поле, локализованное в части объема изделия и границы этого поля, с одной стороны, трудноопределимы, с другой – нестабильны.

Таким образом при построении теории индуктивного преобразователя с магнитопроводом возможен учет меньшего числа факторов по сравнению с преобразователем в виде катушки, поле которой взаимодействует с изделием. Заметим, что последняя схема нашла широкое применение в электромагнитной дефектоскопии, теория которой специфична [72].

Индуктивный преобразователь может быть построен с использованием экрана (элемента конструкции, выполненного из электропроводного материала и используемого в режиме существенного проявления вихревых токов).

Для индукционного преобразователя необходим источник внешнего постоянного магнитного поля, который может быть выполнен с использованием постоянного магнита или электромагнита. Перемещение катушки в постоянном поле или модуляция этого поля приводит к появлению в катушке индуцированной Э.Д.С.

Осуществить преобразование величины перемещения в выходной параметр катушки можно перемещая катушку в переменном магнитном поле, создаваемым внешним источником в виде электромагнитной системы из катушки возбуждения, питаемой переменным током, и магнитопровода. Особенностью электромагнитной системы, возбуждающей переменное поле (в отличие от преобразователя в виде катушки с магнитопроводом), является постоянство параметров, что позволяет рассматривать этот элемент в виде самостоятельного объекта целевого назначения.

Таблица 3.

Классификация индуктивных преобразователей

№№ ПП	Взаимодействующие элементы									Выходная величина	Способ преобразования	Измеряемая величина	Номер схемы преобразователя на рис. 14
	Катушка	Система катушек	Экран	Изделие	Магнитопровод	Источник переменного поля	Источник постоянного поля	Распределенная катушка	Источник тока				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	■									Индуктивность и полное сопротивление	Изменение геометрических размеров катушки	Перемещение	1
											Изменение числа витков		2
2		■								Взаимная индуктивность и полное сопротивление	Изменение взаимного положения катушек	Перемещение	3, 4, 5
3	■		■							Индуктивность и полное сопротивление	Изменение взаимного положения катушки и экрана	Перемещение	6, 7

Продолжение 1 табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4										Индуктивность и полное сопротивление	Изменение взаимного положения катушки и изделия	Перемещение	8
											Изменение объема изделия в магнитном поле катушки	Размеры	9, 10, 11, 12
											Изменение электромагнитных параметров изделий	Структура и механические свойства	9, 10, 11, 12
5										Индуктивность и полное сопротивление взаимная индуктивность	Изменение электромагнитных свойств материала магнитопровода	Механическое напряжение	13, 14, 15
											Изменение магнитного сопротивления магнитопровода вследствие изменения объема поля в немагнитных зазорах между взаимно перемещающимися частями магнитопровода, за счет а) преимущественного изменения суммарной длины зазоров	Перемещение	16, 17, 18, 19, 20
											б) преимущественного изменения площади поперечного сечения потока в зазоре		21, 22, 23, 24, 25, 26
											в) одновременного изменения обеих параметров		27, 28

Продолжение 2 табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5											Изменения взаимного положения катушки и разомкнутого магнитопровода	Перемещение	29, 30
6										Индуктивность и полное сопротивление	Изменение реактивной составляющей магнитного сопротивления магнитопровода вследствие изменения положения экрана в немагнитном зазоре магнитопровода	Перемещение	31, 32, 33, 34
7										Трансформаторная Э. Д. С.	Изменение взаимной индуктивности катушки возбуждения и измерительной катушки вследствие изменения их взаимного положения	Перемещение	35, 36, 37, 38, 40
8										Индуктивная Э. Д. С.	Перемещение катушки относительно постоянного магнитного поля	Скорость перемещения	41, 42, 43, 44, 45
											Модуляция постоянного магнитного потока через катушку		46
9										Индуктивность и полное сопротивление	Изменения взаимного положения магнитопровода с катушкой и изделия, включенного в магнитную цепь	Перемещение	47, 48, 49, 50

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
9	■			■	■						Изменение объема изделия, являющегося частью магнитопровода катушки	Размеры	51, 52
10						■		■		Трансформаторная Э. Д. С.	Изменение длины части распределенной катушки, охватываемой основным магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения, вследствие перемещения части магнитопровода, экрана или постоянного магнита	Перемещение	53, 54, 55, 56, 57, 58
11	■			■					■	Трансформаторная Э. Д. С.	Изменение взаимной индуктивности между контуром тока и катушкой, вследствие анизотропии электромагнитных свойств изделия (использование эффекта Видемана)	Структура и механические свойства изделия	59, 60
12					■			■		Индуктивность и полное сопротивление	Изменение длины части распределенной катушки, создающей основной магнитный поток в магнитопроводе.	Перемещение	-

И, наконец, возможны различные сочетания перечисленных выше элементов при построении индуктивного измерительного преобразователя. Возможные способы построения преобразователей из основных элементов приведены в табл. 3. При использовании этой таблицы следует учесть сделанные выше заключения о возможности трансформаторной схемы практически для любого индуктивного преобразователя. Поэтому в табл. 3 преобразователи с изменением взаимоиндукции или с трансформаторной Э.Д.С. на выходе выделены в случаях, имеющих принципиальное значение, и тогда, когда иная схема преобразователя невозможна.

Конструктивная реализация сочетания основных элементов может быть различной. Примеры основных реализаций (в варианте одинарного преобразователя) приведены на рис. 14, где представлены следующие преобразователи (сохранена терминология первоисточников с описанием этих преобразователей):

1) преобразователь с изменяемыми геометрическими размерами катушки или с изменяемой ее конфигурацией [171],

2) преобразователь с переменным числом витков катушки [11],

3) преобразователь с изменяющейся связью между катушками [171],

4) преобразователь с изменением взаимосвязи между элементами катушки (вариометр) [171],

5) индуктосин [11],

6) катушка с короткозамкнутым экраном [171],

7) индуктивный экранный преобразователь [11],

8) экранный преобразователь [11],

9) индукционный накладной преобразователь [74],

10) индукционный экранный преобразователь [74],

11) индукционный наружный проходной преобразователь [74],

12) индукционный внутренний проходной преобразователь [74],

13) магнитоупругий датчик силы [11],

14) магнитоупругий датчик силы [58],

15) магнитоупругий магнитоанизотропный датчик силы [58],

16) преобразователь с переменной длиной немагнитного зазора,

17) преобразователь малых перемещений с переменной длиной зазора [135],

18) преобразователь с профилированным зазором [11],

19) преобразователь с переменным зазором и Ш – образным сердечником [11],

20) трансформаторный преобразователь с переменным зазором [147],

21) преобразователь малых перемещений [135],

22) преобразователь с переменной площадью зазора,

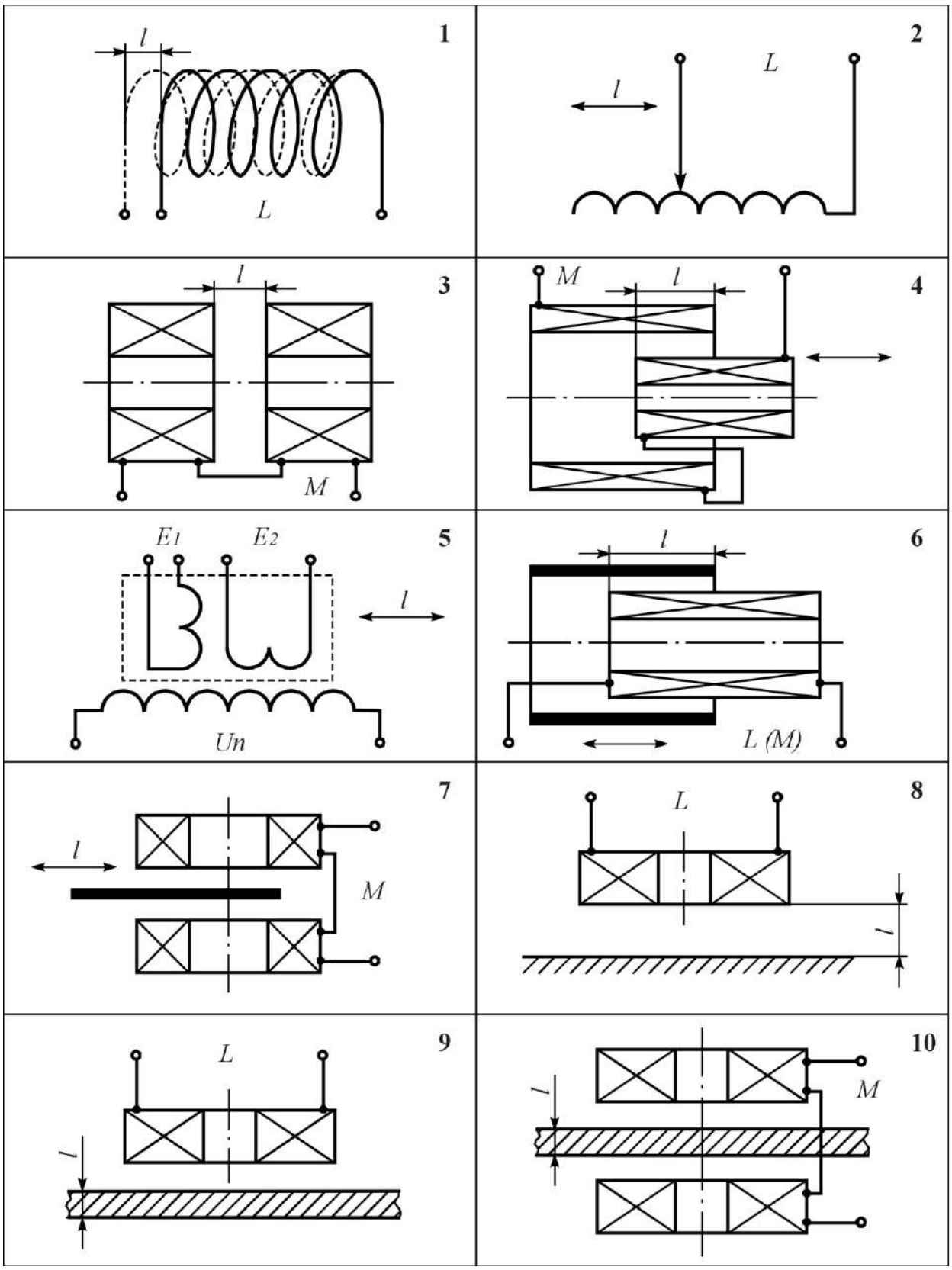


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

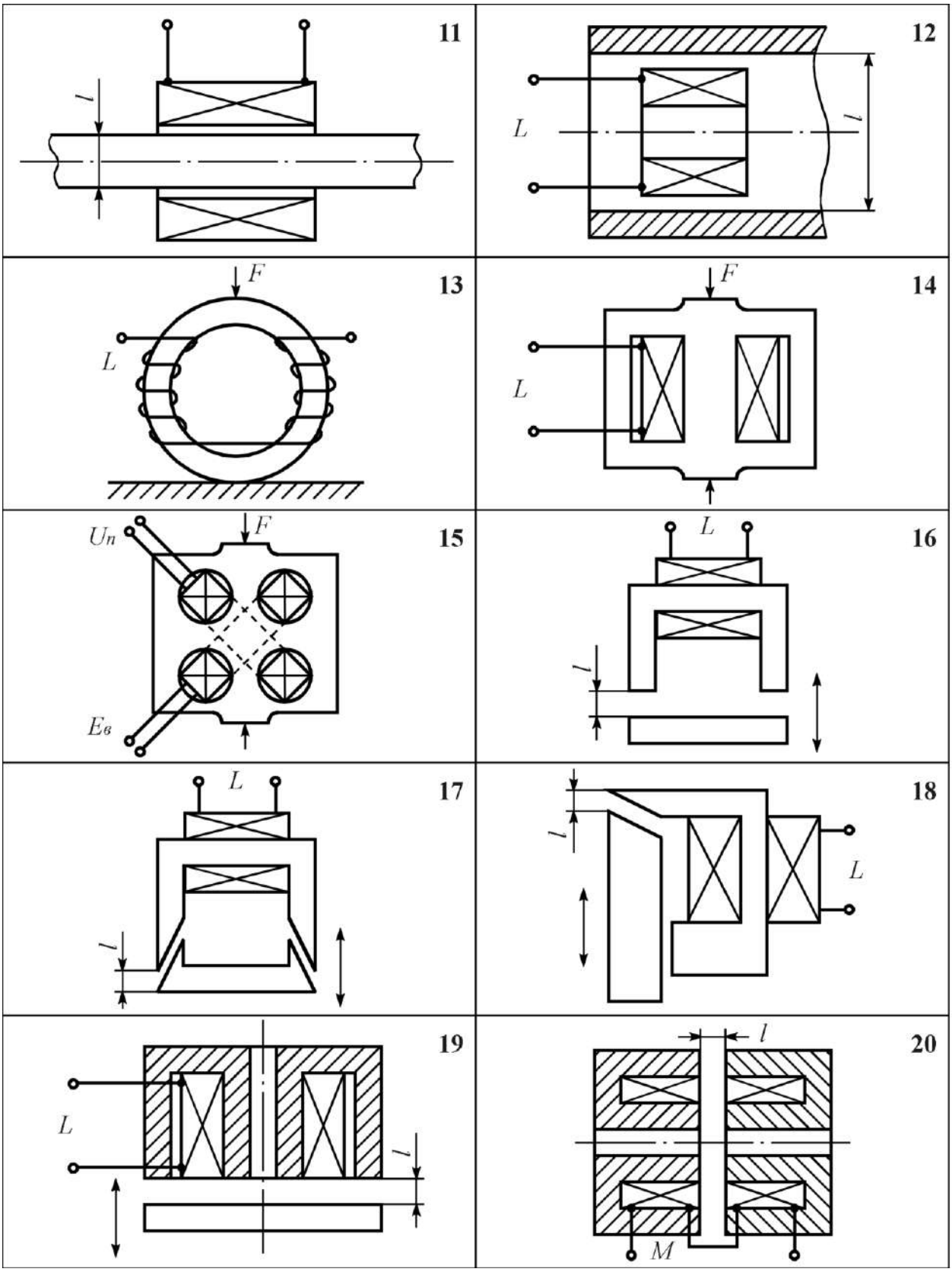


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

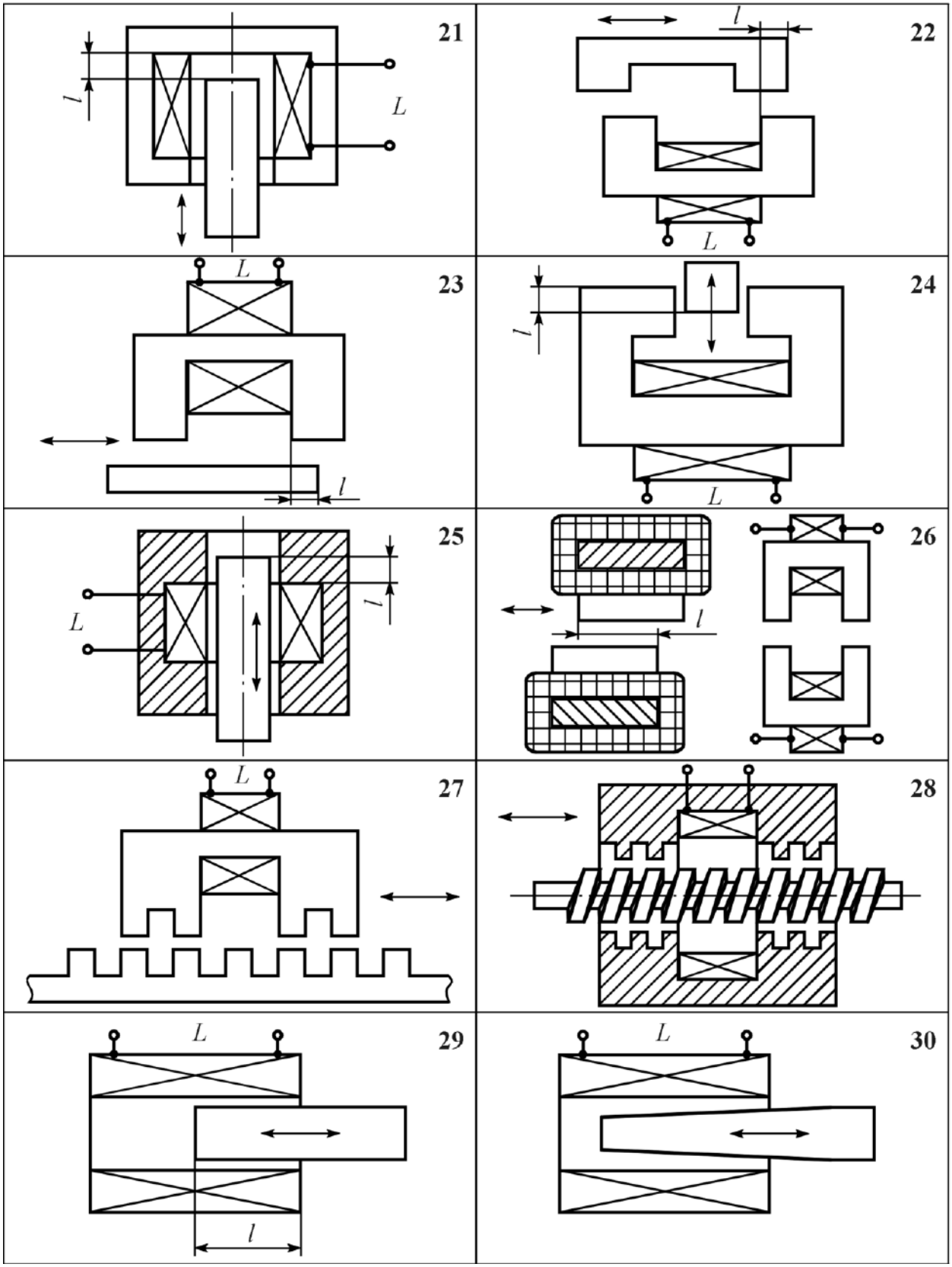


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

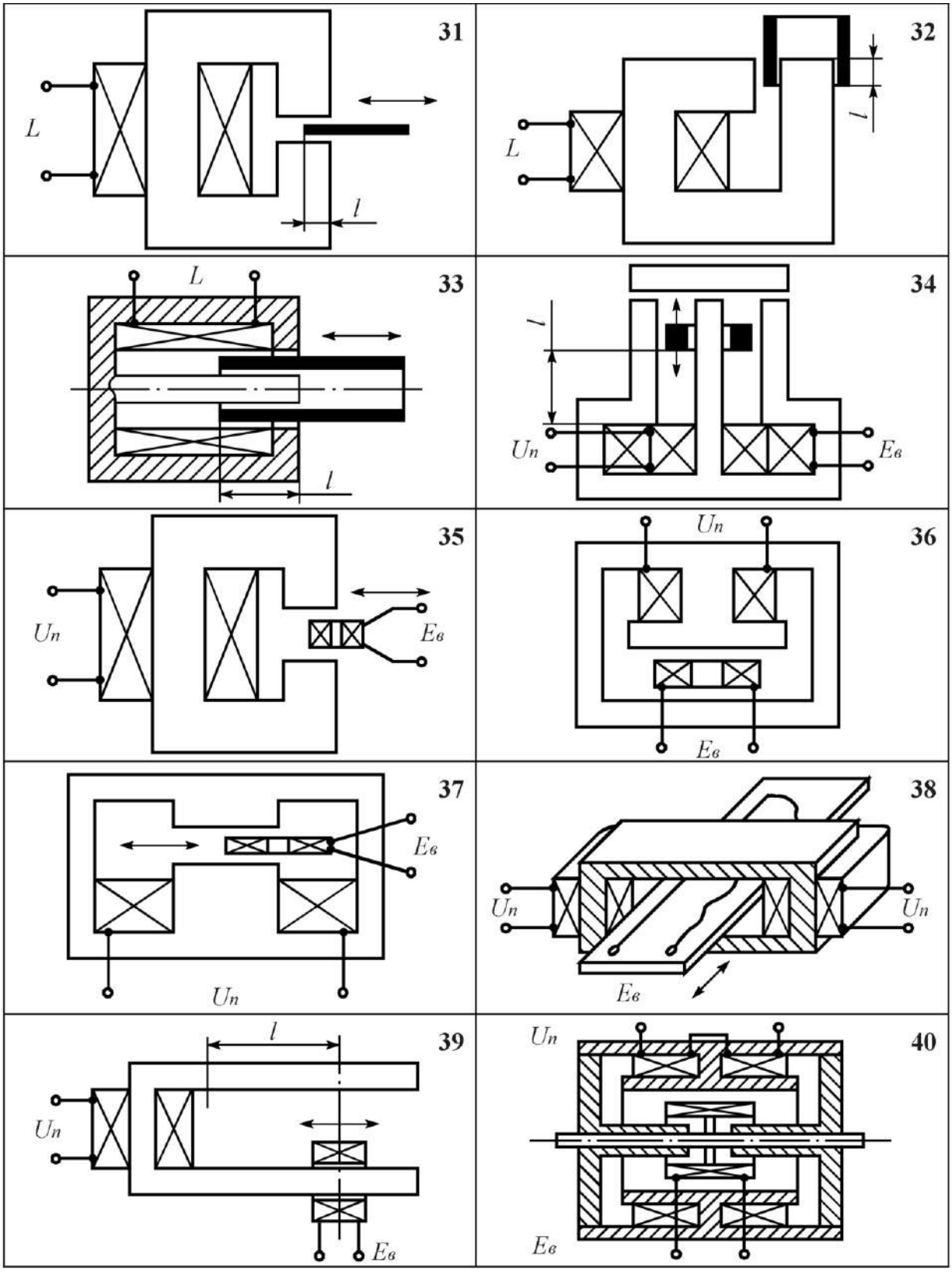


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

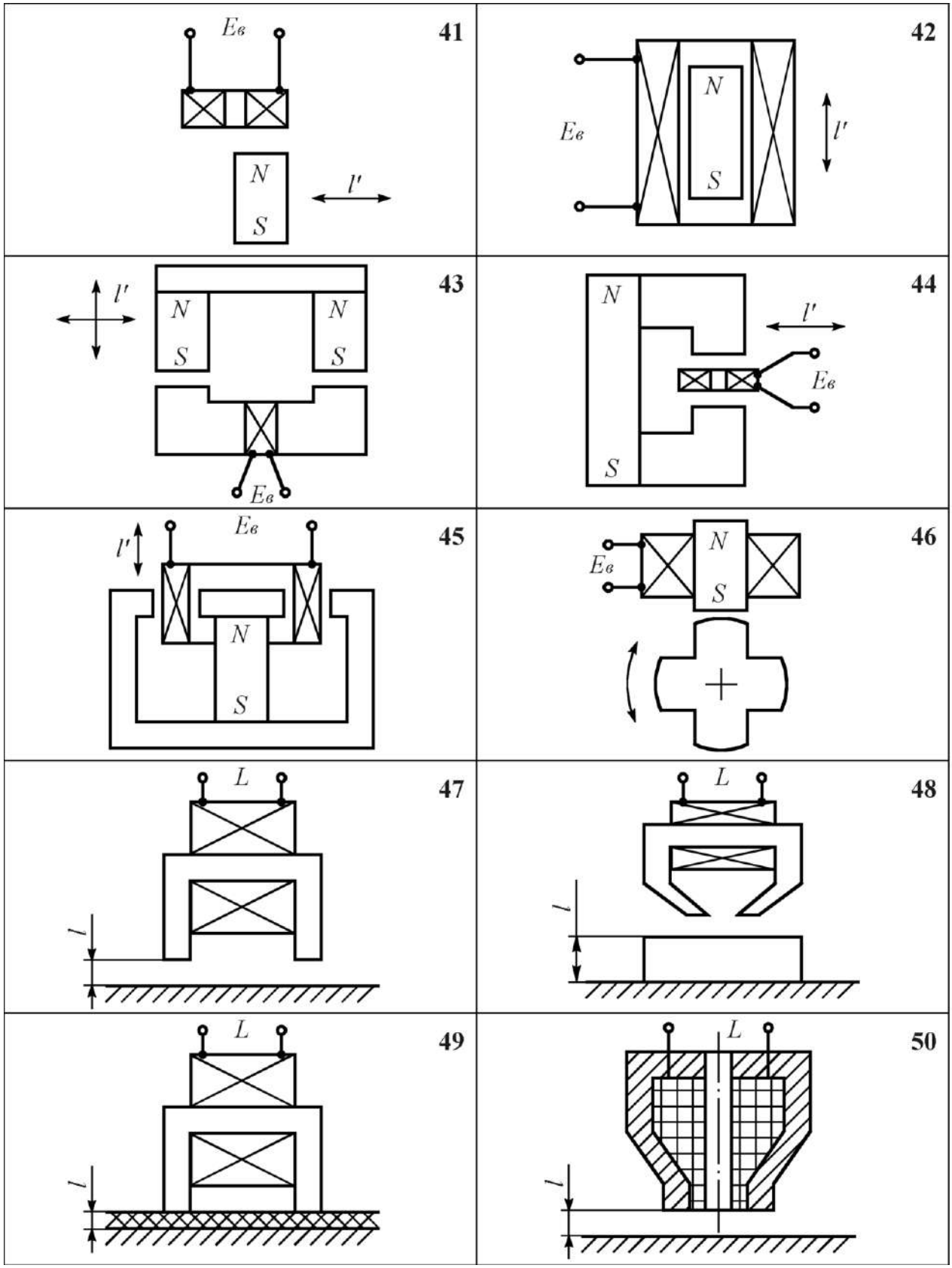


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

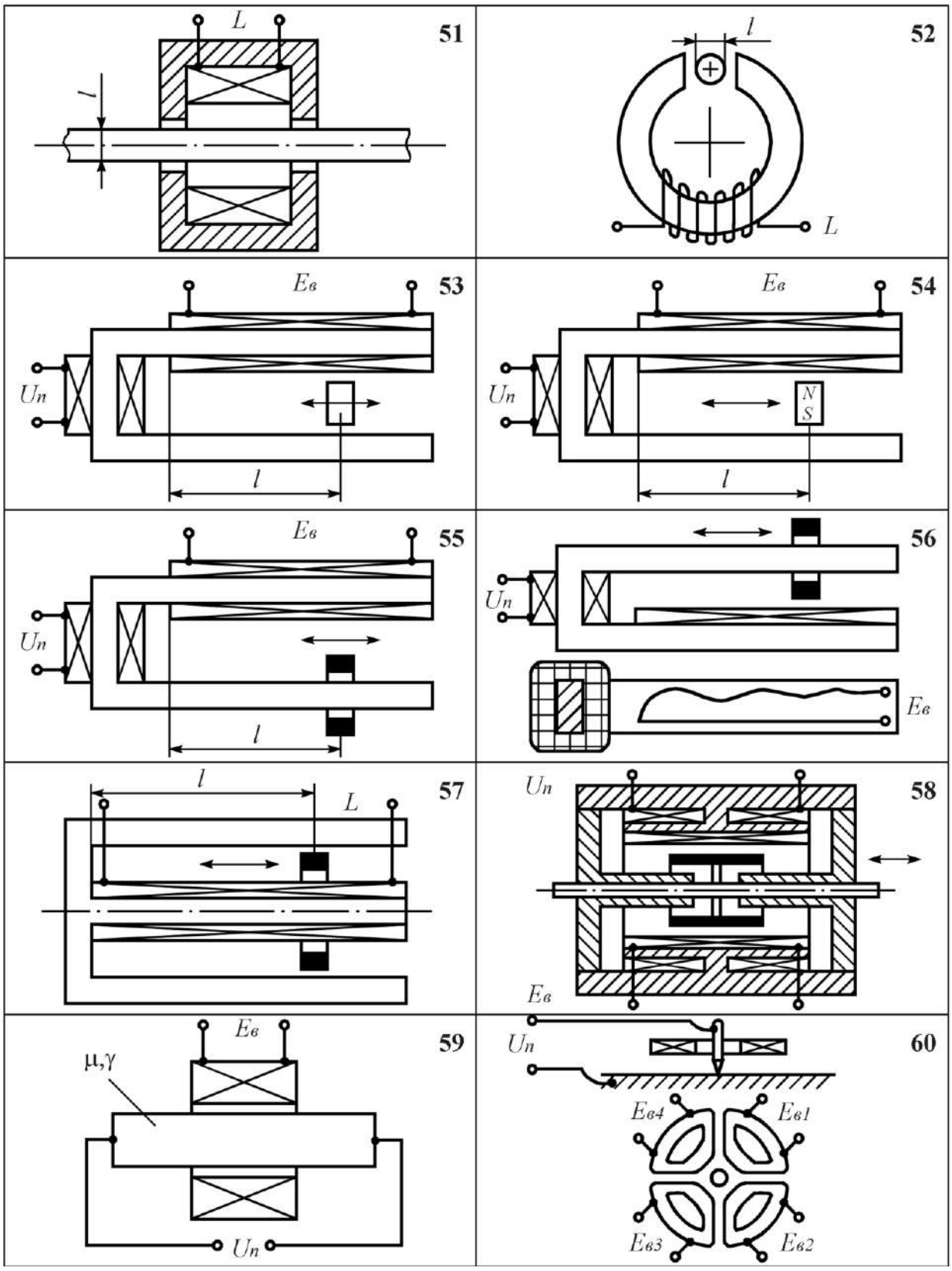


Рис. 14. Схемы индуктивных преобразователей

23) преобразователь с переменной площадью зазора [11],

24) индуктивный преобразователь с переменной площадью воздушного зазора [265],

25) преобразователь с переменной площадью зазора и цилиндрическим сердечником,

26) индукционный линейный преобразователь с изменяющейся проводимостью между статором и ротором [189],

27) индуктивный датчик с зубчатыми полюсными наконечниками [11],

28) индуктивный преобразователь с зубчатым воздушным зазором [185],

29) преобразователь с проходным якорем [294],

30) соленоидный преобразователь с профилированным сердечником [11],

31) преобразователь с короткозамкнутым витком [265],

32) преобразователь с короткозамкнутым витком [265],

33) экранный преобразователь [11],

34) преобразователь перемещений на принципе индукционной подвески [57],

35) трансформаторный преобразователь с подвижной обмоткой [106],

37) преобразователь с подвижной сигнальной катушкой [116, 175],

38) функциональный преобразователь с профилированной плоской обмоткой [117, 118, 139],

39) преобразователь с распределенными параметрами и подвижной обмоткой [79],

40) преобразователь с подвижной обмоткой [166],

41) магнитомодуляционный датчик с подвижным магнитом [11],

42) индукционный преобразователь с подвижным магнитом [185],

43) магнитомодуляционный датчик с подвижным магнитом [11],

44) индукционный преобразователь [265],

45) магнитоэлектрический генераторный преобразователь [171],

46) индукционный преобразователь с переменным магнитным сопротивлением [185],

47) бесконтактный индуктивный преобразователь с переменным зазором,

48) бесконтактный индуктивный преобразователь [110],

49) датчик толщины покрытий,

50) бесконтактный датчик [11],

51) датчик диаметра проволоки,

52) индукционный щелевой датчик [74],

53) преобразователь с распределенными электромагнитными параметрами и подвижным ферромагнитным сердечником [79],

54) преобразователь с распределенными параметрами и подвижным магнитом [79],

55) преобразователь с распределенными параметрами и подвижным экраном [79],

56) функциональный преобразователь с профилированным вторичным контуром [85],

57) индуктивный преобразователь с распределенными параметрами и подвижным сердечником [261],

58) функциональный трансформаторный преобразователь с подвижным короткозамкнутым витком [117, 139, 118],

59) электродно-катушечный магнитоанизотропный датчик момента [58],

60) электродно-катушечный анизотропный датчик [58].

С учетом существующих классификаций электромеханических устройств, частным видом которых является индуктивный преобразователь (например, [219]), и особенностей описания преобразователя с точки зрения теории электромагнитного поля для индуктивных измерительных преобразователей предлагается классификационная схема, приведенная рис. 15. При этом предлагаются следующие определения:

Индуктивный измерительный преобразователь – средство измерений, преобразующее неэлектрическую физическую величину в электрическую физическую величину, основанное на использовании свойств электромагнитного поля и содержащее катушку индуктивности.

Индуктивные преобразователи в первую очередь следует разделить по принципу преобразования, поскольку этот признак определяет элементный состав преобразователя и используемые при преобразовании проявления электромагнитного поля.

Преобразователь типа “измерительная катушка” выполнен в виде катушки индуктивности без магнитопровода, индуктивность которой зависит от измеряемого параметра

$$X_L = \omega L(l),\ L(l) = \psi(l) / I$$

где X_L – реактивное сопротивление катушки; ω - круговая частота тока I в катушке; L – индуктивность катушки; l – измеряемый параметр; ψ - потокосцепление катушки.

Преобразователь может быть осуществлен по схемам 1 и 2 на рис. 14.

Взаимоиндуктивный преобразователь представляет собой систему электрически соединенных и индуктивно связанных катушек без магнитопровода, характеризуемых взаимной индуктивностью

$$X_L = \omega[\sum L_i \pm \sum M_i(l)],$$

Рис. 15. Классификация индуктивных измерительных преобразователей

где *Mi (l)* – взаимоиндуктивность катушек, зависящая от измеряемого параметра.

Преобразователь может быть осуществлен по схемам 3 и 4 на рис. 14. Строго говоря, индуктивно связанные катушки могут иметь магнитопроводы (например, схема 20 на рис. 14). Однако, поскольку в последнем случае задача описания преобразователя в основном сведется к задаче нахождения магнитного потока в магнитной цепи, подобный преобразователь целесообразно отнести к электромагнитным.

Электромагнитный преобразователь выполняется в виде катушки индуктивности с магнитопроводом, причем преобразование осуществляется либо за счет изменения магнитного сопротивления магнитопровода, либо за счет взаимного перемещения магнитопровода и катушки. Такой преобразователь по сути представляет собой обращенный электромагнит. Выходной величиной электромагнитного преобразователя является полное сопротивление катушки

$$\dot{Z}_L(l) = R(l) + j\omega L(l).$$

Существенное значение имеет замкнутость или разомкнутость магнитопровода. В случае “замкнутого” магнитопровода (то есть при наличии немагнитных зазоров, сопротивление которых соизмеримо с сопротивлением ферромагнитных участков) магнитопровод можно рассматривать как магнитную цепь практически полностью локализующую магнитный поток в пространстве и тогда

$$\dot{Z}_L = \dot{F} / I\dot{Z}_\mu(l),$$

где $\dot{F}$ - магнитодвижущая сила, создаваемая током I в катушке; $\dot{Z}_\mu(l)$ - магнитное сопротивление магнитопровода.

В случае разомкнутого магнитопровода (сердечника), последний вызывает перераспределение магнитного потока катушки в пространстве и изменение его величины

$$\Phi_L(l) = \int_S \dot{B}(l)d\dot{S} = \int_S \mu\dot{H}(l)d\dot{S},$$

$$\dot{H}(l) = \dot{H}_l - N(l)\dot{G}(l),$$

где $\dot{B}(l)$ - вектор индукции; S – площадь потока; μ - магнитная проницаемость; $\dot{H}_l$ - напряженность поля, создаваемого током в катушке; $\dot{H}(l)$ - напряженность поля в точках сердечника; N – размагничивающий фактор; $\dot{G}(l)$ - намагниченность сердечника.

Электромагнитные преобразователи “магнитная цепь” могут быть реализованы по различным схемам, например, по схемам 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,

21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 47, 48, 49, 50, 51, 52 на рис. 14. Возможно и дальнейшее деление этих преобразователей: преобразователи с переменной длиной немагнитного зазора (схемы 16, 17, 18, 19, 20, 21, 47, 48, 49, 50 на рис. 14), магнитоупругие преобразователи (схемы 13, 14, 15 на рис. 14), преобразователи с переменной площадью магнитного потока в немагнитном зазоре (схемы 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 на рис. 14) и другие. На схеме рис. 15 это деление не приводится, поскольку они имеют близкое математическое описание, основанное на законах магнитной цепи. Можно заметить, в частности, что преобладание схем преобразователей "магнитная цепь", обусловило широкое распространение методов расчета магнитных цепей в теории индуктивных измерительных преобразователей и, в ряде случаев, необоснованное распространение этих методов на преобразователи иных типов.

Преобразователь с разомкнутым магнитопроводом подобен обращенному цилиндрическому электромагниту со втяжным якорем (соленоиду) и для него предлагается название "соленоидный", который получило определенное распространение в технической литературе [160, 202 211]. Конструктивные схемы таких преобразователей показаны на рис. 14 под номерами 29 и 30.

Перечисленные выше преобразователи являются параметрическими преобразователями, их выходная величина это полное или реактивное сопротивление катушки протекающему току.

Индукционный преобразователь – это преобразователь основанный на использовании свойства электромагнитной индукции и реализуемый в виде катушки индуктивности, перемещающейся в магнитном поле, создаваемым внешним источником. Выходной величиной индукционного преобразователя является индуктируемая в измерительной катушке Э.Д.С.

$$e = -\frac{d\psi}{dt},$$

где ψ - потокосцепление измерительной катушки с внешним полем.

Индуктируемая ЭДС носит импульсный характер при постоянном внешнем поле. Такой преобразователь используется для измерения скорости перемещения

$$e(l) = f\left(\frac{dl}{dt}\right).$$

Если катушка движется во внешнем переменном поле с круговой частотой ω, то индуктируемая в катушке ЭДС будет переменной с частотой ω, промодулированная по амплитуде и по фазе (трансформаторная ЭДС).

Индукционные преобразователи являются генераторными преобразователями. Их целесообразно в свою очередь разделить по виду внешнего поля и по

характеру взаимодействия элементов. В предлагаемой классификации выделены следующие основные разновидности.

Магнитоэлектрический преобразователь содержит катушку индуктивности и источник внешнего поля в виде постоянного магнита. Выходная величина такого преобразователя – импульсная ЭДС

$$e(l) = \frac{d\psi(l)}{dt} = f\left(\frac{dl}{dt}\right).$$

Примеры магнитоэлектрических преобразователей показаны на схемах 41, 42, 43, 44, 45, 46 рис. 14. Следует отметить, что в известных работах среди магнитоэлектрических преобразователей выделяются магнитомодуляционные преобразователи (схемы 43 и 46 на рис. 14) [23, 76, 89, 137]. В предлагаемой классификации эти преобразователи специально не выделены, поскольку в принципе безразлично будем ли мы перемещать катушку в поле, источник поля относительно катушки или часть источника внешнего поля – во всех случаях происходит модуляция потока, пронизывающего катушку.

Ферродинамический преобразователь, в отличие от магнитоэлектрического, имеет в качестве источника внешнего поля электромагнит. При питании электромагнита постоянным током действие преобразователя аналогично действию магнитоэлектрического преобразователя. Если электромагнит питается переменным током, то выходной величиной преобразователя будет трансформаторная ЭДС

$$e(l) = e_m \sin \omega t \cdot f(l),$$

где e_m - амплитудное значение ЭДС.

Ферродинамические преобразователи на рис. 14 представлены схемами 35, 36, 37, 38, 39, 40, 53, 54.

Токовихревой преобразователь характеризуется тем, что источником внешнего поля, взаимодействующего с полем катушки являются вихревые токи, возбуждаемые переменным полем самой катушки в электромагнитных массах (в специальных экранах или контролируемых изделиях, обладающих электропроводностью). Несмотря на то, что конструктивный элемент в виде дополнительной катушки возбуждения в таком преобразователе отсутствует, тем не менее по принципу преобразования его следует рассматривать как индукционный. Токовихревыми (экранными) преобразователями являются схемы 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 31, 32, 33, 34, 55, 56, 57, 58 на рис. 14.

В работах [2, 3, 4, 5, 7, 8, 57] преобразователи, имеющие подвижный экран и магнитопровод, определяются как преобразователи с индукционной подвеской (схема 34 на рис. 14). Последнее название отражает факт действия электромагнитных сил на экран, принцип же преобразования измеряемой величины

заключается в изменяющемся взаимодействии поля катушки с полем вихревых токов в экране, поэтому в предлагаемой классификации эти преобразователи отнесены к токовихревым (экранным) .

Электродинамический преобразователь в качестве источника внешнего поля имеет систему катушек без магнитопровода. Преобразование осуществляется за счет изменения потокосцепления измерительной катушки с полем, создаваемым системой катушек возбуждения (схемы 3 и 4 на рис. 14 при условии раздельных выводов от катушек, схема 5 на рис. 14).

Электродно-катушечный преобразователь основан на взаимодействии системы измерительных катушек с магнитным полем, создаваемым током в контролируемом изделии, и в качестве обязательного элемента содержит источник тока в изделии. Выходная ЭДС преобразователя пропорциональна величине анизотропии электромагнитных свойств изделия или измеряемой величине, изменение которой вызывает изменение анизотропии этих свойств (эффект Видемана). Электродно-катушечные преобразователи представлены схемами 59 и 60 на рис. 14.

В табл. 4 представлены возможные варианты состава элементов, образующих перечисленные выше преобразователи с разным принципом преобразования.

С точки зрения построения математической модели преобразователя большое значение имеют особенности распределения магнитного поля катушки в пространстве. По этому признаку преобразователи предложено разделить на четыре группы: катушка без магнитопровода, магнитопровод близкий к замкнутому, магнитопровод разомкнутый и преобразователь с электромагнитными массами в поле катушки. При описании каждая из групп имеет свои особенности. Так для описания преобразователей с “замкнутым” магнитопроводом в большинстве случаев достаточно использование законов магнитной цепи

- закона полного тока

$$\oint \dot{H} d\dot{l} = \sum i \ ,$$

- законов Кирхгофа

$$\sum \Phi = 0, \ \sum U_M = \sum i\omega,$$

- закона Ома

$$\dot{F} = \dot{\Phi} \dot{Z}_\mu, \ \dot{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu.$$

При описании преобразователя с разомкнутым сердечником возникает задача учета неоднородности намагничивающего поля и фактора размагничивания

$$\dot{H} = \dot{H}_l - N\dot{I} \ ,$$

где $\dot{H}$ - вектор напряженности магнитного поля в сердечнике; $\dot{H}_l$ - вектор напряженности внешнего поля; $\dot{I}$ - вектор намагниченности сердечника.

Таблица 4

		Тип индуктивного преобразователя																	
		Измерительня катушка	Взаимоиндуктивный (вариометр)	Магнитная цепь		Соленоидный	Токовихревой			Магнитоэлектрический		Ферродинамический		Электродинамический	Электродно-катушечный	
Элементы преобразователя	Катушка	▨		▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	
	Система катушек		▨											▨		▨
	Магнитопровод «замкнутый»			▨	▨				▨		▨		▨			
	Магнитопровод разомкнутый					▨										
	Экран						▨		▨							
	Изделие				▨			▨								
	Постоянный магнит									▨	▨					
	Электромагнит											▨	▨			
	Источник тока в изделии														▨	▨

Задача описания преобразователя с разомкнутым сердечником сложнее задачи описания магнитной цепи.

В магнитном поле катушки могут находиться электромагнитные массы в виде контролируемого изделия или различных экранов. При этом возникает задача определения границ распределения магнитного потока в электромагнитной массе и оценка ее влияния на суммарный магнитный поток катушки. Задача в общем виде может быть решена с использованием основных законов электромагнитного поля

- уравнения Максвелла

$$r_C t\dot{H} = \bar{\delta} + \frac{d\dot{D}}{dt},$$

$$r_C t\dot{E} = -\frac{d\dot{B}}{dt},$$

- уравнение Умова-Пойнтинга

$$-\oint \overline{\Pi} d\dot{S} = \int_V \gamma \dot{E}^2 dV + \frac{d\omega_{ЭМ}}{dt}.$$

В классификационной схеме на рис. 15 в качестве классификационного признака указан также режим работы преобразователя. При этом если потери на вихревые токи выражены слабо и потери на гистерезис перемагничивания невелики, то задачу описания преобразователя можно свести к магнитостатической задаче, что существенно упрощает описание и позволяет построить математическую модель преобразователя с использованием основных закономерностей магнитного поля постоянного тока

$$r_C t\dot{A} = \mu_a \dot{H},\ div\dot{A} = 0,$$

где $\dot{A}$ - векторный потенциал магнитного поля.

В противном случае описание преобразователя усложняется и должно базироваться на полной системе уравнений электромагнитного поля

$$r_C t\dot{H} = \gamma \dot{E} + \varepsilon_a \frac{d\dot{E}}{dt},\ div\dot{H} = 0,$$

$$r_C t\dot{E} = -\mu \frac{d\dot{H}}{dt},\ div\dot{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Таким образом, предлагаемая классификация имеет в своей основе особенности примененного принципа преобразования и особенности математического его описания. Можно отметить, что в настоящее время в достаточной степени разработана только теория преобразователей на основе магнитных цепей, которая, как можно видеть из приведенной выше классификации и ее пояснений, не может быть использована в качестве общей теории индуктивных измерительных преобразователей.

2.3. Оценка требований к индуктивному измерительному преобразователю как к элементу автоматизированной информационно-измерительной системы

В настоящее время законодательной метрологией индуктивный измерительный преобразователь наряду с другими измерительными преобразователями рассматривается как одно из средств измерений и для него нормируется определенный комплекс метрологических характеристик, предусмотренный стандартом ГОСТ 8.009-84. Последний стандарт условием составления комплекса оговаривает необходимость учета специфики и назначения средства измерений, не оговаривая, однако, механизма этой взаимосвязи.

В качестве нормируемых устанавливаются 15 обособленных метрологических характеристик. Недостатком такого подхода является отсутствие однозначного решения вопроса об установлении детерминированной взаимосвязи между назначением преобразователя и требованием к его метрологическим свойствам, отсутствие интегральной оценки метрологического качества преобразователя, неопределенность оценки его метрологических свойств в динамике.

Перечисленные недостатки делают установившийся подход к нормированию метрологических характеристик (на основе которых затем оценивается качество существующего преобразователя или разрабатывается новый) нерациональным. В настоящее время предлагаются различные подходы к расчетному определению суммарной погрешности средства измерения на основе ее составляющих и к экспериментальному определению этой погрешности.

Большим вкладом в разработку вопроса явились работы П.В. Новицкого, предложившего и разработавшего информационно-энергетический подход к интегральной оценке метрологического качества средства измерений [169, 265]. Информационно-энергетическая теория измерительных средств, разработанная применительно к средствам измерения электрических величин, безусловно имеет общий характер и применима и к средствам измерения неэлектрических величин, при соответствующей разработке дополнительных разделов, учитывающих специфические особенности таких измерений.

Показатель относительной энергетической добротности позволяет дать интегральную оценку метрологического качества измерительного устройства и оценить степень приближения его характеристик к предельно допустимым величинам. Основные выводы информационно-энергетической теории позволяют оценить предел информационной способности средств измерений в статике.

Однако, в связи со все более широким внедрением автоматических и автоматизированных систем управления упомянутый подход к измерительным преобразователям представляется недостаточным. Оценка его качества должна вестись с точки зрения требований, предъявляемых к измерительному преобразователю для достижения требуемого качества функционирования системы управления в целом с рассмотрением динамики процессов управления.

Известен целый ряд работ, в которых исследуются динамические свойства индуктивных измерительных преобразователей [27, 70, 76, 117, 134, 135, 147, 277, 281, 282]. Однако, авторы при этом ограничиваются оценкой одной из составляющих динамической погрешности преобразователя, и только в работе [277] автор оценивает вид переходного процесса в цепи индуктивного преобразователя при ступенчатом входном воздействии.

При проектировании средств автоматизации необходимо обеспечить требуемое качество переходных процессов и точность автоматической системы. Рассмотрим этот вопрос с точки зрения определения требований к измерительному устройству, обеспечивающему обратную связь в системе и ее замыкание по управляемому параметру.

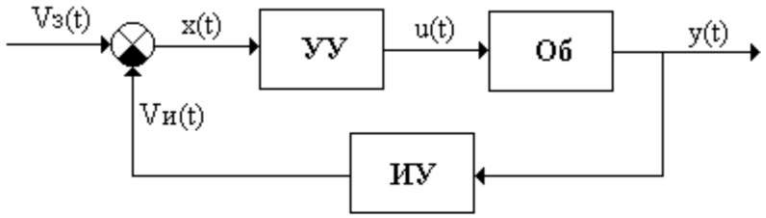


Рис. 16. Состав автоматической системы

Автоматическую систему можно представить функциональной схемой на рис.16, где УУ - устройство управления, Об - объект управления, ИУ - измерительное устройство. В системе выделим следующие основные сигналы и воздействия: *Vз(t)* - задающее воздействие, определяющее заданное значение управляемого параметра, *y(t)* - управляемый параметр, *x(t)* - ошибка, *u(t)* - управляющее воздействие, *Vu(t)* - измерительный сигнал.

Опишем динамические свойства исследуемой системы, используя методы теории управления. В результате получим структуру системы, показанную на рис. 17, где *Wo(p)* - передаточная функция объекта управления, *Wy(p)* - передаточная функция устройства управления, *Wu(p)* - передаточная функция измерительного устройства.

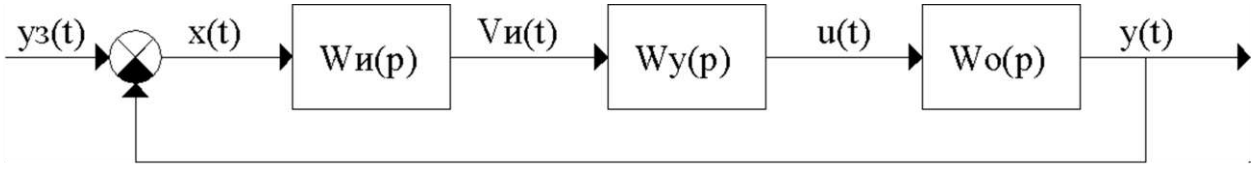


Рис. 17. Структура автоматической системы

Пусть устройство управления и объект управления определены и их описания известны

$$W_c(p) = W_y(p)W_o(p),$$

необходимо определить требования к динамическим свойствам измерительного устройства, при выполнении которых оно не ухудшает динамические свойства системы в целом.

Динамику измерительного устройства можно описать одним из следующих свойств:

- безынерционность $W_u(p) = K_u$,
- инерционность $W_u(p) = \dfrac{K_u}{T_u p + 1}$,

• колебательность $W_u(p) = \dfrac{K_u}{T_u{}^2 p^2 + 2\chi T_u p + 1}$,

где K_u - коэффициент усиления, T_u - постоянная времени, χ - коэффициент демпфирования. Безынерционное измерительное устройство является идеальным представлением реального измерительного устройства и таковым его можно приближенно считать только в том случае, когда оно не оказывает реального влияния на динамику автоматической системы в целом. Для оценки динамических свойств измерительного устройства представляется целесообразным принять характер переходной характеристики (апериодическая или колебательная), постоянную времени T_u и коэффициент демпфирования χ.

Для оценки влияния реального измерительного устройства на динамику автоматической системы рассмотрим частотные характеристики системы

$$W(j\omega) = W_u(j\omega)W_c(j\omega) = A_u(\omega)e^{j\phi_u(\omega)}A_c(\omega)e^{j\phi_c(\omega)},$$

где $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ - соответственно, модуль и фазовый угол частотной характеристики. В случае инерционного измерительного устройства

$$A_{uu}(\omega) = \frac{K_u}{\sqrt{1+\omega^2 T_u{}^2}}, \quad \phi_{uu}(\omega) = -Arctg(\omega T_u),$$

для колебательного измерительного устройства

$$A_{uк}(\omega) = \frac{K_u}{\sqrt{(1-\omega^2 T_u{}^2)^2 + \omega^2(2\chi T_u)^2}}, \quad \phi_{uк}(\omega) = -Arctg\frac{2\chi T_u \omega}{1-\omega^2 T_u{}^2}.$$

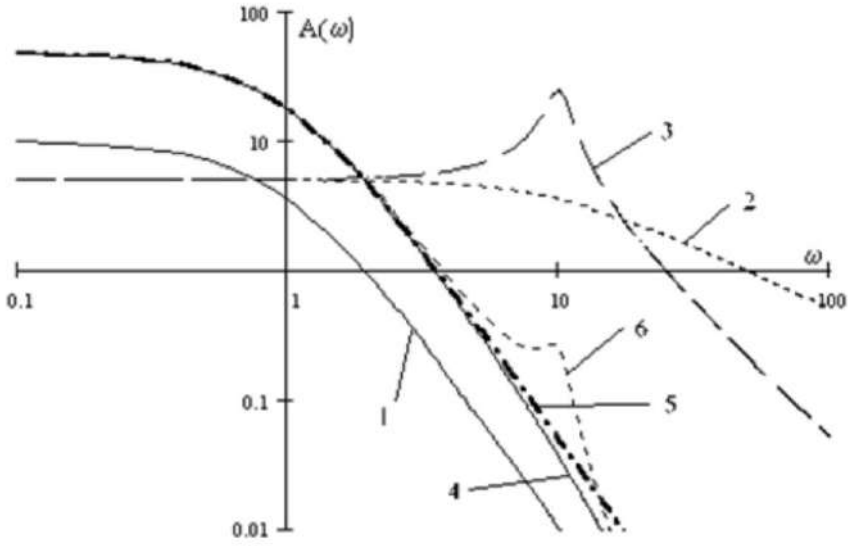


Рис. 18. Частотные характеристики системы

На рис. 18 приведены примеры амплитудно-частотных характеристик автоматической системы при различных динамических свойствах

измерительного устройства (логарифмические характеристики). Изображенные на рис. 18 графики имеют следующий смысл: 1 - характеристика $A_c(\omega)$ исходной системы без измерительного устройства, описываемой дифференциальным уравнением третьего порядка; 2 - характеристика $A_{ии}(\omega)$ инерционного измерительного устройства; 3 - характеристика $A_{ик}(\omega)$ колебательного измерительного устройства; 4 - характеристика $A_c(\omega)A_{ии}(\omega)$ системы с инерционным измерительным устройством; 5 - характеристика $A_c(\omega)K_u$ системы с безынерционным измерительным устройством: 6 - характеристика $A_c(\omega)A_{ик}(\omega)$ системы с колебательным измерительным устройством.

Постоянная времени *Tu* измерительного устройства выбрана существенно меньше основной (наибольшей) постоянной времени основной системы. При этом условии динамические свойства измерительного устройства, как видно из графиков, практического влияния на динамику системы не оказывают. Такие характеристики системы, как частота среза, запас устойчивости по фазе и по амплитуде (определялись с учетом фазовых характеристик) изменяются незначительно по сравнению со случаем использования безынерционного измерительного устройства. Следовательно, при достаточно малой постоянной времени измерительного устройства по сравнению с основной постоянной времени исходной системы, влиянием собственных динамических свойств измерительного устройства на динамику системы можно пренебречь.

Используем для оценки допустимого значения постоянной времени измерительного устройства следующие соображения. Если постоянная времени T_u такова, что соответствующая ей частота влияния

$\omega_u = \dfrac{1}{T_u} \geq (3 \div 5)\omega_\pi$, где ω_π - частота фазового сдвига - π радиан для системы с безынерционным измерительным устройством, то динамические свойства измерительного устройства практически не влияют на такие динамические характеристики системы в целом, как частота среза, запас устойчивости по фазе и амплитуде.

Частота ω_π может быть найдена решением уравнения

$\phi_c(\omega_\pi) = -\pi$,

где $\phi_c(\omega)$ - фазовый угол частотной характеристики исходной системы.

Увеличение постоянной времени измерительного устройства ухудшает динамику системы в целом и может привести к потере устойчивости системой. Критическое значение постоянной времени измерительного устройства может быть определено через запас устойчивости системы по фазе

$$\phi_з = \pi + \phi_c(\omega_c),$$

где ω_c - частота среза системы с безынерционным измерительным устройством, определяемая из уравнения

$$K_u A_c(\omega_c) = 1.$$

При $\phi_u(\omega_c) = \phi_з$ система становится неустойчивой, следовательно, критическое значение постоянной времени $T_{икр}$ инерционного измерительного устройства может быть найдена из уравнения

$$\phi_з = Arctg(\omega_c T_{икр}).$$

Соответствующее уравнение для колебательного измерительного устройства

$$\phi_з = Arctg \frac{2\chi T_{икр}\omega}{1-\omega^2 {T_{икр}}^2}.$$

Рассмотрим динамическую составляющую погрешности измерительного устройства в виде разности мгновенного значения измерительного сигнала и его установившегося значения

$$\Delta(t) = V_u(t) - V_{иуст}.$$

При входном сигнале (изменение измеряемой величины) $x(t) = 1(t)$, $V_{иуст} = K_u$. Для инерционного измерительного устройства переходная характеристика

$$V_u(t) = K_u(1 - e^{-\frac{t}{T_u}}),$$

следовательно, динамическая составляющая погрешности

$$\Delta(t) = K_u e^{-\frac{t}{T_u}}, \quad \delta(t) = \frac{\Delta(t)}{V_{иуст}} = e^{-\frac{t}{T_u}},$$

где $\delta(t)$ - относительная величина динамической погрешности.

Пусть $t = t_e = T_u$, тогда $\delta(t_e) = 1/e$, следовательно, задавшись допустимым временем t_e уменьшения отклонения измерительного сигнала от установившегося значения до величины *1/e*, можно определить требования к величине постоянной времени измерительного устройства $T_u \le t_e$. Полученная нами оценка требований к динамической характеристике измерительного устройства, хорошо согласуется с линейной интегральной оценкой качества регулирования

$$J_1 = \int_0^\infty (y(t) - y(\infty))dt = \frac{b_{m-1}a_n - a_{n-1}b_m}{a_n^2},$$

где $y(t)$ - выходной сигнал, a_i, b_j - коэффициенты дифференциального уравнения системы. Для инерционного измерительного устройства $b_{m-1} = 0$,

$b_m = K_и$, $a_{n-1} = T_u$, $a_n = 1$. Интегральная оценка качества измерительного устройства $J_1 = -T_u K_u$. Допускаемое наибольшее значение интегральной оценки качества измерительного устройства из условия ограничения его динамической погрешности $J_{1\max} = -t_e K_u$.

Таким образом, условием, определяющим требования к динамической погрешности измерительного устройства, является условие

$|J_1| \le t_e K_u$.

Колебательное измерительное устройство можно охарактеризовать амплитудным значением относительной динамической ошибки

$\delta_m(t) = \dfrac{e^{-\frac{\chi}{T_u}t}}{\sqrt{1-\chi^2}}$, а время уменьшения ошибки $t_e = \dfrac{(1-\ln\sqrt{1-\chi^2})T_u}{\chi}$.

Предлагаемый подход позволяет увязать требования к динамическим характеристикам измерительного устройства с динамическими характеристиками системы автоматического управления, в которой оно используется, и целесообразен, главным образом, для приборов и устройств автоматического контроля.

На основе приведенных выше рассуждений исследуем динамику индуктивного измерительного преобразователя, с целью оценки его переходных процессов и динамической ошибки.

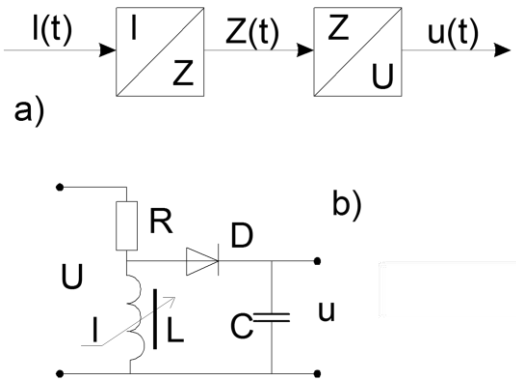


Рис. 19. Схемы идуктивного преобразователя

Функциональная схема индуктивного измерительного преобразователя показана на рис. 19 а). Она состоит из индуктивного датчика перемещений, преобразующего перемещение *l(t)* в полное сопротивление *Z(t)* катушки индуктивности, и вторичного измерительного преобразователя, преобразующего полное сопротивление *Z(t)* в электрическое напряжение *u(t)* (или ток).

На рис. 19 b) показана упрощенная принципиальная схема, реализующая описанную функциональную схему и используемая для описания динамики процесса преобразования измерительного сигнала. Индуктивность *L* датчика образует делитель напряжения с сопротивлением *R*. Делитель питается напряжением переменного тока

$U(t) = Um \cdot \sin(\omega t)$,

где *Um* – амплитуда напряжения питания, ω - круговая частота питающего тока, *t* – время.

Падение напряжения на индуктивности *L* датчика зависит от перемещения *l* якоря датчика и имеет характер переменного тока. Это напряжение выпрямляется схемой пикового детектора, содержащего диод *D* и емкость *C*. Выходным сигналом преобразователя является выпрямленное напряжение *u(t)*. При изменении входного перемещения это напряжение будет изменяться во времени.

Описанная упрощенная принципиальная схема пригодна для моделирования различных принципиальных решений схем включения индуктивных измерительных преобразователей с выпрямителями, например, для широко распространенных мостовых схем включения.

В пределах рабочего диапазона измерения индуктивный датчик обычно имеет линейную градуировочную характеристику

$$L(t) = S \cdot l(t) + Lc,$$

где *S* – чувствительность датчика по индуктивности к входному перемещению, *Lc* – среднее значение индуктивности в рабочей точке градуировочной характеристики.

Падение напряжения на катушке индуктивного датчика

$$u_L(t) = L(t) \cdot \frac{di}{dt} = S \cdot l(t) \cdot \frac{di}{dt},$$

где *i(t)* – ток в катушке.

В результате процесс преобразования входного перемещения в выходное напряжение переменного тока можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{du_L}{dt} = \omega \cdot Um \cdot \cos(\omega t) - \frac{R \cdot u_L(t)}{Lc + S \cdot l(t)}.$$

Для исследования быстродействия предположим, что входное перемещение изменяется скачком $l(t) = 1(t)$ (единичная ступенчатая функция). Тогда дифференциальное уравнение запишется в следующем виде

$$\frac{du_L}{dt} = \omega \cdot Um \cdot \cos(\omega t) - \frac{R}{L} \cdot u_L(t),$$

где *L=Lc+S* – рабочее значение индуктивности датчика.

Решим полученное уравнение, используя средства MathCAD. Для этого подвергнем уравнение преобразованию Лапласа по времени t

$$\frac{d}{dt}u(t) = Um \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \omega - R \cdot \frac{u(t)}{L} \text{ laplace}, t$$

в результате получим ($u(t) = u_L(t)$)

$$\text{laplace}(u(t), t, s) \cdot s - u(0) = Um \cdot \omega \cdot \frac{s}{\left(s^2 + \omega^2\right)} - \frac{R}{L} \cdot \text{laplace}(u(t), t, s)$$

Выполним подстановку

$$\text{substitute}, \text{laplace}(u(t), t, s) = P$$

и получим уравнение для изображения Лапласа выходного сигнала

Предположим нулевые начальные условия *u(0)=0* и решим уравнение отно-

$$P\cdot s - u(0) = Um\cdot\omega\cdot\frac{s}{\left(s^2+\omega^2\right)} - \frac{R}{L}\cdot P$$

$$P\cdot s = Um\cdot\omega\cdot\frac{s}{\left(s^2+\omega^2\right)} - \frac{R}{L}\cdot P \ \text{solve},P \ \rightarrow Um\cdot\omega\cdot\frac{s}{\left[\left(s^2+\omega^2\right)\cdot\left(s+\frac{R}{L}\right)\right]}$$

$$Um\cdot\omega\cdot\frac{s}{\left[\left(s^2+\omega^2\right)\cdot\left(s+\frac{R}{L}\right)\right]} \ \text{invlaplace},s$$

сительно изображения P Лапласа

Выполним обратное преобразование Лапласа по аргументу *s*
и получим решение дифференциального уравнения $u_L(t)$ =

Полученное выражение позволяет определить переходный процесс установления выходного напряжения датчика при скачкообразном смещении его подвижного якоря из исходного положения. Рассмотрим следующий пример

$$Um\cdot\omega^2\cdot L^2\cdot\frac{\sin(\omega\cdot t)}{\left(R^2+L^2\cdot\omega^2\right)} + Um\cdot\omega\cdot L\cdot R\cdot\frac{\cos(\omega\cdot t)}{\left(R^2+L^2\cdot\omega^2\right)} \quad R\cdot Um\cdot\omega\cdot L^2\cdot\frac{\exp\left(\frac{-R}{L}\cdot t\right)}{\left(R^2\cdot L+L^3\cdot\omega^2\right)}$$

для реальных параметров датчика соленоидного типа.

$Lc := 50\cdot10^{-3}$ - средняя индуктивность катушки, Гн,

$S := 6\cdot10^{-3}$ - чувствительность датчика, Гн/мм,

$f := 10000$ - частота тока питания датчика, Гц,

$Um := 1$ - амплитуда напряжения питания датчика, В,

$\omega := 2\cdot\pi\cdot f \qquad L := Lc + S \qquad R := \omega\cdot L$

$t := 0, 0.0000001 .. 0.001$

$$u(t) := Um\cdot L^2\cdot\omega^2\cdot\frac{\sin(\omega\cdot t)}{R^2+L^2\cdot\omega^2} + Um\cdot\omega\cdot L\cdot R\cdot\frac{\cos(\omega\cdot t)}{R^2+L^2\cdot\omega^2} - Um\cdot\omega\cdot R\cdot L^2\cdot\frac{\exp\left(-R\cdot\frac{t}{L}\right)}{R^2\cdot L+L^3\cdot\omega^2}$$

График переходного процесса $u_L(t)$ показан на рис. 20. График построен расчетным путем в среде MathCAD. Как видно из графика, переходный процесс для выходного сигнала заканчивается примерно через 0,1 мс. При увеличении индуктивности датчика длительность переходного процесса также возрастает.

Увеличение частоты питающего тока ведет к уменьшению длительности переходного процесса. Расчеты показали, что при рассматриваемых параметрах датчика, переходный процесс длится в пределах одного периода питающего тока в диапазоне изменения частоты питания от 1000 Гц до 1 МГц.

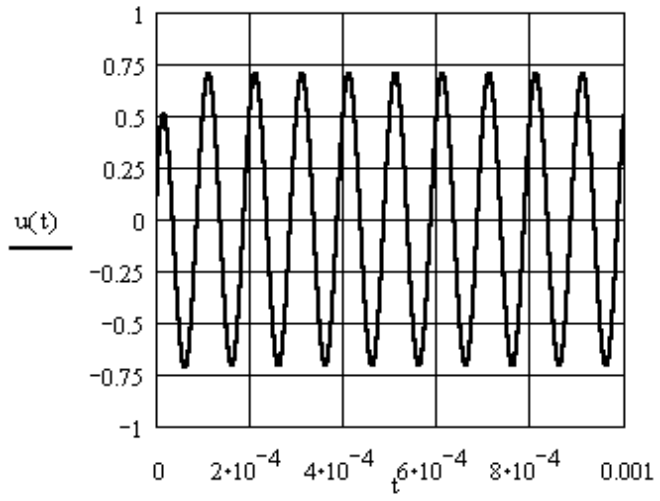


Рис. 20. Переходный процесс датчика

Динамика пикового детектора может быть описана дифференциальным уравнением следующего вида

$$\frac{du}{dt} = \frac{u_L(t) - u(t)}{Rd \cdot C},$$

$$Rd = \begin{cases} r_{np}, u_L(t) > u(t) \\ R_{об}, u_L(t) \le u(t) \end{cases},$$

где Rd – сопротивление выпрямительного диода,

r_{np} – сопротивление диода в прямом направлении,

$R_{об}$ – сопротивление диода в обратном направлении.

Заметим, что пиковый детектор, обеспечивая однополупериодное выпрямление, обладает худшими характеристиками, что позволяет рассматривать его применение в качестве предельного случая. Рассмотрим пример моделирования пикового детектора.

Моделирование пикового детектора

C := 10^-6 - емкость конденсатора фильтра, Ф,

Ro := 10^5 - обратное сопротивление выпрямительного диода,

rd := 1 - прямое сопротивление диода, Ом,

F := 10000 - частота тока, Гц

Um := 1 - амплитуда напряжения, В,

ω := 2·π·F u0 := 0 t := 0, 0.000001 .. 0.001 - время процесса, с.

uL(t) := Um·sin(ω·t) - моделирование сигнала датчика.

Дифференциальное уравнение

$$D(t,u) := \begin{cases} \dfrac{(uL(t) - u_0)}{rd \cdot C} & \text{if } uL(t) > u_0 \quad \text{- заряд конденсатора,} \\ \dfrac{(uL(t) - u_0)}{Ro \cdot C} & \text{otherwise} \quad \text{- разряд конденсатора.} \end{cases}$$

Решение дифференциального уравнения

$z := \text{Bulstoer}(u, 0, 0.001, 1000, D) \qquad i := 0 .. \text{rows}(z) - 1$

$$Ub(t) := \begin{cases} \dfrac{uL(t)}{10} + 0.9 & \text{if } uL(t) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- вспомогательный график для полупериода входного напряжения.

Сигнал датчика $u_L(t)$ в рассматриваемом примере моделируется гармоническим напряжением амплитудой 1 В. Рассчитывается выходной сигнал $u(t)=u_0(t)$ пикового детектора. Для этого сигнала строится график. Кроме того строится вспомогательный график *Ub(t)* однополупериодного сигнала для привязки выходного сигнала пикового детектора к входному сигналу.

Графики приведены на рис. 21. Из графиков видно, что процесс устанавливается через 0,25 мс, а установившиеся пульсации выпрямленного напряжения составляют 1,2 мВ, или 0,12 % от амплитудного значения входного напряжения. Разница между амплитудным значением выходного сигнала и входного сигнала составляет 0,06 %. Две последние величины характеризуют погрешность преобразования сигнала выпрямителем.

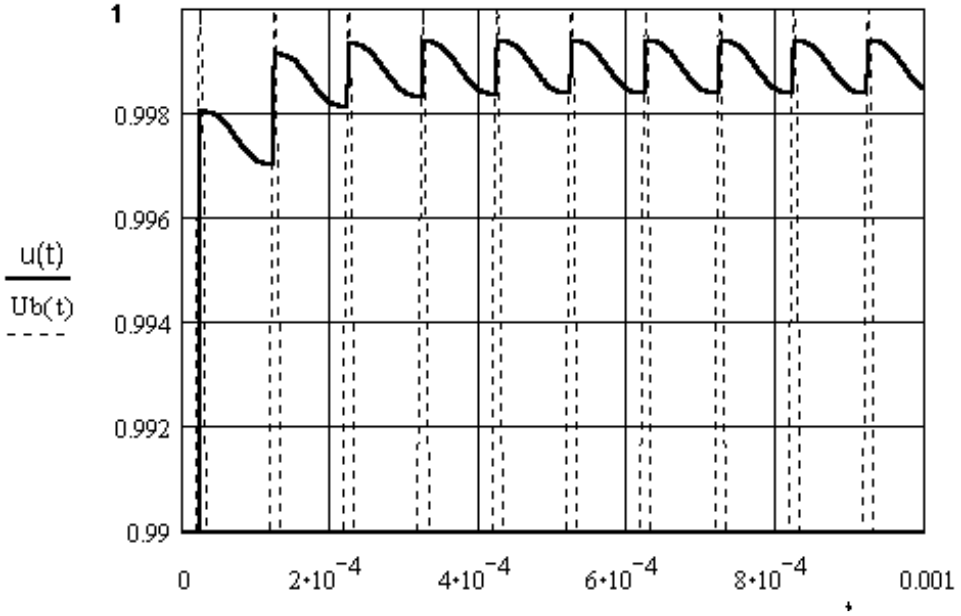


Рис. 21. Процесс пикового детектора

Характеристики пикового детектора зависят от параметров используемого диода и емкости конденсатора фильтра. При увеличение последней возрастает длительность переходного процесса, а также уменьшаются амплитуда выходного напряжения и величина пульсаций. Описанная модель позволяет легко учитывать все эти изменения.

Полное описание динамики индуктивного преобразователя можно получить объединением описаний индуктивного датчика и пикового детектора. В результате получим следующую систему уравнений:

$$u_L(t) = \omega \cdot L \cdot Um \cdot \frac{\omega \cdot L \cdot \sin(\omega \cdot t) + R \cdot \cos(\omega \cdot t) - R \cdot \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right)}{R^2 + \omega^2 \cdot L^2},$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{u_L(t) - u(t)}{Rd \cdot C}, \qquad Rd = \begin{cases} r_{np}, u_L(t) > u(t) \\ R_{об}, u_L(t) \le u(t) \end{cases}, \text{ при } l(t)=1(t),$$

где $u(t)$ – выходное напряжение преобразователя, L - индуктивность датчика, R – сопротивление делителя напряжения, Rd – внутреннее сопротивление выпрямительного диода, r_{np} – сопротивление диода в прямом направлении, $R_{об}$ – сопротивление диода в обратном направлении.

Эта система уравнений описывает переходный процесс для выходного напряжения индуктивного измерительного преобразователя при скачкообразном изменении измеряемого входного перемещения, т.е. входное перемещение задается единичной ступенчатой функцией *1(t)*, что принято при оценке быстродействия динамических систем.

Моделирование переходных процессов преобразователя в среде Mathcad дает следующий результат:

Исходные данные:

$f := 10000 \quad Lc := 50 \cdot 10^{-3} \quad S := 6 \cdot 10^{-3} \quad L := Lc + S$

$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad R := \omega \cdot Lc \quad rd := 1 \quad Ro := 10^5 \quad Um := 1 \quad C := 10^{-6} \quad u_0 := 0$

$t := 0, 0.000001 .. 0.001$

Система уравнений для решения:

$$uL(t) := \omega \cdot L \cdot Um \cdot \frac{\omega \cdot L \cdot \sin(\omega \cdot t) + R \cdot \cos(\omega \cdot t) - R \cdot \exp\left(\frac{-R}{L} \cdot t\right)}{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}$$

$$D(t,u) := \begin{cases} \frac{uL(t) - u_0}{rd \cdot C} & \text{if } uL(t) > u_0 \\ \frac{uL(t) - u_0}{Ro \cdot C} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Решение системы уравнений:

$z := Bulstoer(u, 0, 0.001, 1000, D) \qquad i := 0 .. rows(z) - 1$

Расчет выполнен для датчика, средняя индуктивность которого составляет 50 мГн и чувствительность к перемещениям – 6 мГн/мм. Датчик включен в схему делителя напряжения с резистором R, сопротивление которого равно реактивному сопротивлению датчика в рабочей точке. Частота тока питания

датчика составляет 10 кГц при амплитудном значении напряжения питания 1 В. Параметры выпрямительного диода моделируются без учета нелинейности его рабочей характеристики и сопротивление диода в прямом направлении принято равным 1 Ом, а обратное сопротивление диода – 100 кОм.

На рис. 22 показан переходный процесс для выходного напряжения *u(t)* индуктивного измерительного преобразователя. В течение 0,1 мс происходит переходный процесс индуктивного датчика, затем по истечению примерно 0,3 мс устанавливается напряжение на выходе пикового детектора. В установившемся режиме выходное напряжение имеет пульсирующий характер. При использовании измерительного преобразователя в цифровой измерительной системе это напряжение подвергается цифровому преобразованию с помощью аналого-цифрового преобразователя. Наличие пульсаций напряжения порождает ошибку преобразования. Кроме того амплитудное значение установившегося на выходе преобразователя напряжения меньше амплитудного значения напряжения на выходе делителя напряжения.

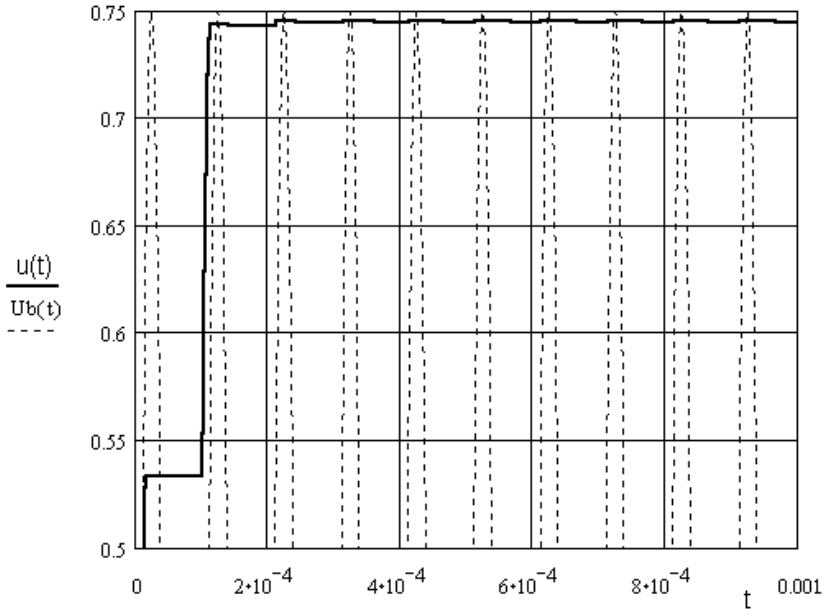


Рис. 22. Переходный процесс индуктивного преобразователя

Последнее определяется следующим образом

$$u_{L\max} = \frac{Um * \omega * L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

В рассматриваемом примере амплитуда выходного напряжения делителя равна 0,74594 В.

Таким образом, при использовании преобразователя в измерительной системе имеет значение длительность переходного процесса, пульсации выходного напряжения в установившемся режиме и несоответствие амплитудного значения выходного напряжения преобразователя амплитудному значению напряжения схемы включения.

Оценим перечисленные параметры. На рис. 23 показан график установившегося процесса на выходе индуктивного преобразователя. По истечению

примерно 0,4 мс на выходе индуктивного преобразователя устанавливается пульсирующее напряжение с постоянной амплитудой. Для дальнейшего преобразования сигнала пульсации являются источником ошибки преобразования.

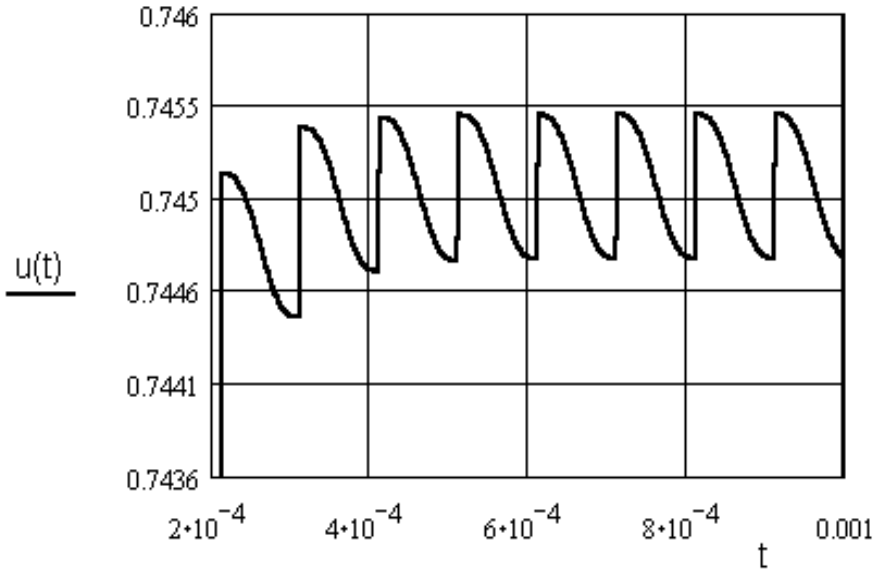


Рис. 23. Установившейся процесс на выходе

Параметры установившегося процесса могут быть определены следующим образом:

$$uLmax := \frac{Um \cdot \omega \cdot L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \qquad uLmax = 0.74594$$

- амплитуда выходного напряжения делителя.

$k := 0 .. 500$

$B_k := \left(z^{<1>}\right)_{k+500}$ $\quad \max(B) = 0.74548$ $\quad \min(B) = 0.74472$

- пределы пульсации выходного напряжения индуктивного преобразователя.

```
tp := | j ← 0
      | while | (z^<1>)_j - MA | > 0.0001
      |     | p ← (z^<0>)_j
      |     | j ← j + 1
      | p
```

- время установления процесса на выходе измерительного преобразователя (время, по истечении которого амплитуда выходного напряжения преобразователя отличается от амплитуды установившегося выходного напряжения преобразователя не более чем на 0.0001 В).

$tp = 3.13 \cdot 10^{-4}$

Время *tp* установления процесса на выходе преобразователя является оценкой его быстродействия. Точность преобразования определится следующими погрешностями:

Пульсации в установившемся режиме:

$PUL := \max(B) - \min(B)$ $\quad OPUL := PUL \cdot \frac{100}{\max(B)}$ - относительная величина в %.

$PUL = 7.60448 \cdot 10^{-4}$ $\quad OPUL = 0.10201$

Погрешность амплитуды:

$uLmax := \frac{Um \cdot \omega \cdot L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}}$ - амплитудное значение выходного напряжен делителя.

$POG := uLmax - \max(B)$ $\quad OPOG := \frac{100 \cdot POG}{uLmax}$ - относительная величина %.

$POG = 4.58882 \cdot 10^{-4}$ $\quad OPOG = 0.06152$

Величина OPUL (в процентах) оценивает амплитуду пульсаций на выходе пикового детектора и приводит к погрешности из-за колебаний выходного сигнала вследствие случайного момента времени выполнения аналого-цифрового преобразования. Относительная величина OPOG (так же в процентах) характеризует систематическую составляющую ошибки преобразования, которая будет проявляться при изменении частоты питания преобразователя и изменении параметров пикового детектора.

Таким образом, полученная модель позволяет определить важнейшие характеристики индуктивного преобразователя в динамическом режиме. Для рассматриваемого примера переходный процесс длится 0,31 мс, величина пульсаций в установившемся режиме составляет 0,1 % от максимального значения, а систематическая погрешность амплитуды выходного напряжения составляет 0,06 % . Следовательно, этот преобразователь может быть использован в измерительном приборе с классом точности 0,25 и с производительностью до 2000 измерений в секунду (при наличии быстродействующего аналого-цифрового преобразователя).

Таблица 5

C, мкФ	f, Гц		
	1000	10000	100000
0.5	2.13 1.98 0.0005	0.210 0.199 0.036	0.141 0.02 0.094
1.0	2.13 0.995 0.002	0.310 0.102 0.062	0.291 0.01 0.1
5.0	2.13 0.2 0.036	1.41 0.02 0.09	1.42 0.004 0.10

Для оценки влияния параметров индуктивного измерительного преобразователя на его метрологические характеристики ниже приведена расчетная таблица 5. Данные для этой таблицы получены путем расчета по описанным выше зависимостям в среде

MathCAD при разных исходных параметрах. В табл. 5 последовательно приведены три величины: *tp* мс, OPUL % и OPOG %.

Величина *tp* характеризует длительность переходного процесса (быстродействие преобразователя), OPUL – относительную величину пульсаций, а OPOG – систематическую погрешность выходного напряжения. Из табл. 5 следует, что быстродействие преобразователя растет с ростом частоты питания. При частоте питания 100 кГц можно создать индуктивный измерительный преобразователь класса точности 0,1 с производительностью до 7000 измерений в секунду.

В предлагаемой модели не учтено влияние тока пикового детектора на схему делителя напряжения, что следует учитывать при ее использовании.

3. Уточнение математической модели индуктивного измерительного преобразователя

3.1. Метрологическая характеристика индуктивного преобразователя

Улучшение метрологических характеристик индуктивных измерительных преобразователей связано с необходимостью разработки уточнённых математических моделей таких преобразователей. Уточнённые модели позволяют полнее учитывать взаимосвязи между конструктивными и эксплуатационными характеристиками преобразователей и их метрологическими характеристиками, что создает возможности для метрологического расчета и целенаправленного совершенствования преобразователей.

Основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя является его характеристика преобразования – градуировочная характеристика. На основе градуировочной характеристики могут быть определены другие метрологические характеристики преобразователя: чувствительность, диапазон измерения, пределы измерения и др. [248,249].

Задача адекватного математического описания градуировочной характеристики индуктивного измерительного преобразователя на сегодняшний день решена только частично и остаётся актуальной. Наиболее перспективным при описании градуировочной характеристики представляется подход, основанный на использовании уравнений Максвелла для электромагнитного поля.

Исследуем возможность решения поставленной задачи с использованием обобщенного подхода на основе теоремы Умова-Пойнтинга, описывающей энергетические соотношения для электромагнитного поля. В качестве базового варианта примем индуктивный преобразователь соленоидного типа, к которому неприменимы методы теории магнитных цепей, наиболее часто используемые для описания индуктивного преобразователя [297,296].

Расчётная схема преобразователя показана на рис. 24. Цилиндрическая катушка индуктивности 1 взаимодействует с соосным ферромагнитным сердечником 2.

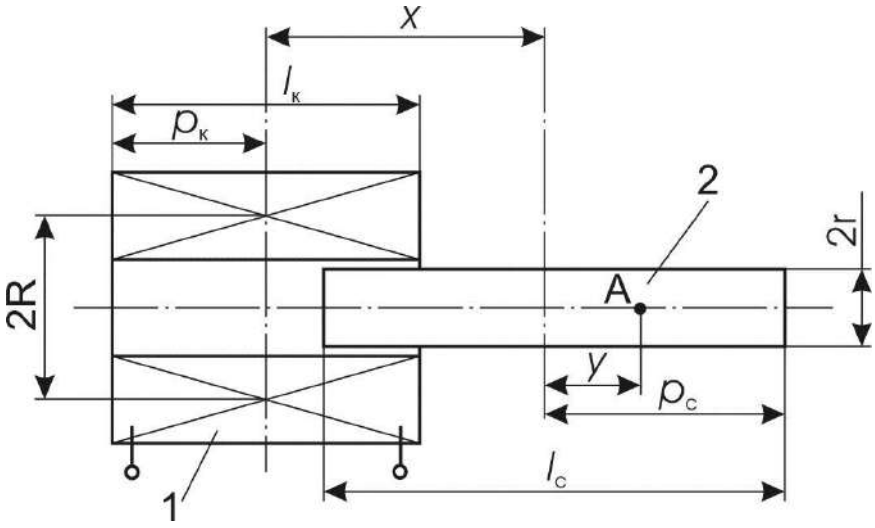


Рис. 24. Расчётная схема преобразователя

Осевое перемещение сердечника 2 (изменение координаты *x*) приводит к изменению магнитного поля катушки, что вызывает изменение её индуктивности *L* и полного сопротивления *Z*. Зависимость индуктивности *L* (или полного сопротивления *Z*) от координаты *x* определит градуировочную характеристику рассматриваемого преобразователя.

Если пренебречь собственным сопротивлением и индуктивностью катушки преобразователя при отсутствии сердечника, то для катушки индуктивности с ферромагнитным проводящим сердечником можно записать выражение для полного сопротивления с использованием теоремы Умова-Пойнтинга

$$Z = R + j\omega L = -\frac{\oint \vec{\Pi} ds}{I^2},$$

где $\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}$ - вектор Пойнтинга через поверхность сердечника; $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля на поверхности сердечника; $\vec{H}$ - вектор напряжённости магнитного поля; *I* – ток в катушке, порождающий магнитный поток; *R* – активное сопротивление катушки; ω - круговая частота тока в катушке.

При решении поставленной задачи используем комплексную форму записи теоремы Умова – Пойнтинга

$$-\oint \vec{\Pi} ds = \int_v \gamma E^2 dv + j2\omega \int_v \left(\frac{\mu_a H^2}{2} - \frac{\varepsilon_a E^2}{2}\right) dv,$$

где ε_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества сердечника; μ_a - абсолютная магнитная проницаемость вещества сердечника; γ - удельная электропроводность вещества сердечника.

Для определения величины напряжённости *H* магнитного поля в некоторой точка *A* сердечника (рис. 24) воспользуемся приближённой формулой [249]

$$H_A = \frac{IW}{4p_к}\left[\frac{p_к + x - y}{\sqrt{(p_к + x - y)^2 + R^2}} - \frac{x - p_к - y}{\sqrt{(x - p_к - y)^2 + R^2}}\right],$$

где R – средний радиус витка катушки; x – расстояние между центром катушки и центром сердечника; W – число витков катушки; $p_к$ - половина длины катушки.

Для определения величины напряжённости E электрического поля используем второе уравнение Максвелла для электромагнитного поля в комплексной форме записи. Ротация вектора напряженности электрического поля сердечника

$$rot\ \vec{\mathrm{E}} = -j\omega\mu_a\vec{H} = \begin{vmatrix} \mathrm{i} & j & k \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_X & E_Y & E_Z \end{vmatrix} =$$

$$= i\left(\frac{\partial E_Z}{\partial y} - \frac{\partial E_Y}{\partial z}\right) + j\left(\frac{\partial E_X}{\partial z} - \frac{\partial E_Z}{\partial x}\right) + k\left(\frac{\partial E_Y}{\partial x} - \frac{\partial E_X}{\partial y}\right),$$

где i, j, k – орты координатных осей системы координат электромагнитного поля; E_x, E_y, E_z – проекции вектора напряжённости электрического поля на координатные оси.

Если ось координат OZ совместить с осью сердечника, а координатную плоскость XOY – с поперечной плоскостью симметрии катушки и учесть, что вектор $\vec{E}$ перпендикулярен вектору $\vec{H}$, получим

$$E_z = 0,\ \frac{\partial E_y}{\partial z} = 0,\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = 0,$$

В этом случае

$$rot\ \vec{E} = \mathrm{k}\left(\frac{\partial \mathrm{E_Y}}{\partial \mathrm{x}} - \frac{\partial E_X}{\partial y}\right).$$

Для определения проекций вектора напряженности электрического поля на координатные оси учтем то, что вектор напряженности электрического поля направлен перпендикулярно оси сердечника по касательной к окружности внешнего контура, тогда

$$E_X = E \cdot \sin\varphi,\ E_Y = -E \cdot \cos\varphi,$$

где E – модуль вектора напряженности электрического поля.

Частные производные проекций вектора напряженности электрического поля на координатные оси

$$\frac{\partial E_Y}{\partial x}=\frac{\partial E_Y}{\partial \varphi}\cdot\frac{\partial \varphi}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(-E\cdot\cos\varphi\right)\cdot\frac{\partial}{\partial x}\left(\arccos\frac{x}{r}\right)=$$

$$=E\cdot\sin\varphi\cdot\left(-\frac{1}{r\sqrt{1-\left(\frac{x}{r}\right)^2}}\right)=E\cdot\sin\varphi\left(-\frac{1}{r\sqrt{1-\cos^2\varphi}}\right)=-\frac{E}{r},$$

$$\frac{\partial E_X}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(E\cdot\sin\varphi\right)\cdot\frac{\partial}{\partial y}\left(\arcsin\frac{y}{r}\right)=$$

$$=E\cdot\cos\varphi\cdot\left(\frac{1}{r\sqrt{1-\left(\frac{y}{r}\right)^2}}\right)=E\cdot\cos\varphi\frac{1}{r\sqrt{1-\sin^2\varphi}}=\frac{E}{r}.$$

Результирующее выражение для ротации вектора напряженности электрического поля в сердечнике примет вид

$$rot\,\vec{E}=k\left(-\frac{E}{r}-\frac{E}{r}\right)=k\left(-\frac{2E}{r}\right).$$

С учетом второго уравнения Максвелла для электромагнитного поля, получим

$$k\left(-\frac{2E}{r}\right)=-j\omega\mu_a\vec{H},$$

откуда следует

$$E=\omega\frac{r\mu_a}{2}H,$$

где H – модуль вектора напряжённости магнитного поля в сердечнике.

Используем выражение для полного сопротивления катушки преобразователя и комплексную форму записи теоремы Умова-Пойнтинга с подстановкой полученного выражения для напряженности электрического поля

$$Z=\frac{1}{I^2}\left[\int_V \gamma E^2 dV+j2\omega\int_V\left(\frac{\mu_a H^2}{2}-\frac{\varepsilon_a E^2}{2}\right)dV\right]=$$

$$=\frac{1}{I^2}\left[\int_V \gamma E^2 dV+j\omega\int_V\left(\mu_a H^2-\varepsilon_a E^2\right)dV\right]=$$

$$=\frac{1}{I^2}\left[\int_V \gamma\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\mu_a^2 H^2 dV+j\omega\int_V\left(\mu_a H^2-\varepsilon_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\mu_a^2 H^2\right)dV\right].$$

Предположим, что материал сердечника изотропен и $\gamma = const$, $\mu_a = const$, $\varepsilon_a = const$, тогда

$$Z = \frac{1}{I^2}\left[\gamma\mu_a{}^2\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2 \cdot \int_v H^2 dv + j\omega\left(\mu_a \int_v H^2 dv - \varepsilon_a\mu_a{}^2\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2 \int_v H^2 dv\right)\right].$$

После преобразований последнего выражения получим

$$Z = \frac{1}{I^2}\left[\gamma\mu_a^2\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2 + j\omega\mu_a\left(1-\varepsilon_a\mu_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\right)\right]\int_V H^2 dV \ .$$

Интегрирование выполняется по объёму сердечника. Подставим в последнюю формулу выражение для напряжённости магнитного поля, приведенное выше,

$$Z = \frac{W^2}{16p_к^2}\left[\gamma\mu_a{}^2\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2 + j\omega\mu_a\left(1-\varepsilon_a\mu_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\right)\right]\cdot\lambda(x),$$

$$\lambda(x) = \pi r^2 \int_{-p_c}^{p_c}\left[\frac{p_к + x - y}{\sqrt{(p_к + x - y)^2 + R^2}} - \frac{x - p_к - y}{\sqrt{(x - p_к - y)^2 + R^2}}\right]^2 dy.$$

Реактивное сопротивление преобразователя

$$X = \frac{\omega\mu_a W^2}{16p_к^2}\left(1-\varepsilon_a\mu_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\right)\cdot\lambda(\ell)\ ,$$

активное сопротивление преобразователя

$$R = \frac{\gamma\mu_a W^2}{16p_к^2}\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\cdot\lambda(\ell)\ .$$

Полученное выражение является математическим описанием градуировочной характеристики индуктивного измерительного преобразователя перемещений, построенного по соленоидной схеме. Входящий в выражение интеграл аналитически не вычисляется, что представляется недостатком полученного описания и обуславливает необходимость численного анализа.

При выводе аналитического описания градуировочной характеристики был сделан ряд допущений, которые ограничивают возможности этого описания. В частности, магнитное и электрическое поле в объеме сердечника принято постоянным по величине. Реально же в проводящих средах наблюдается поверхностный эффект, приводящий к существенной неоднородности напряженностей электрического и магнитных полей.

Кроме этого, напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой в объеме сердечника зависит не только от расстояния между катушкой и сердеч-

ником, но и от удаления рассматриваемой точки от оси сердечника. Последнее обстоятельство также не учитывалось при выводе зависимости.

Перечисленные обстоятельства ограничивают возможности использования предлагаемого описания при расчете величины полного сопротивления преобразователя. Однако, при оценке метрологических характеристик преобразователя, наиболее важным является точность описания характера зависимости выходной величины преобразователя от его входной (измеряемой величины), что и необходимо принимать во внимание в первую очередь.

Принципиальным отличием предлагаемого описания является учет режима работы преобразователя (частоты питающего тока), что позволяет учитывать известную из практики зависимость характеристик преобразователя от схемы включения.

Для проверки полученного описания градуировочной характеристики соленоидного преобразователя осуществлялось сравнение расчетных характеристик с экспериментальными.

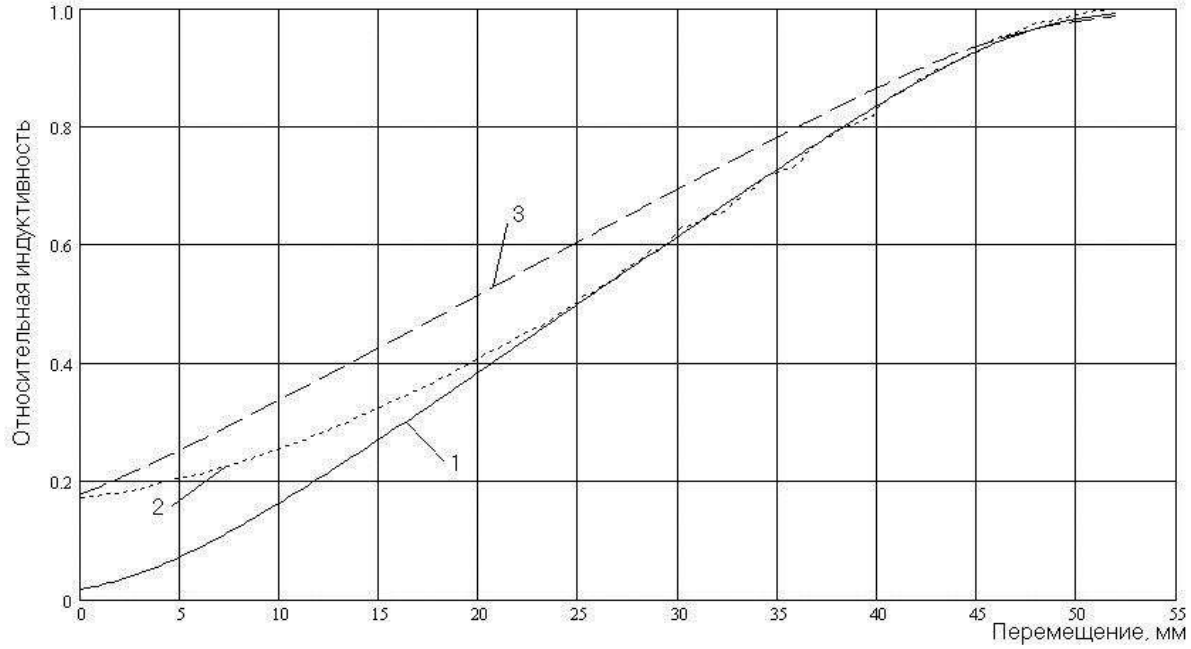


Рис. 15. Градуировочная характеристика индуктивного преобразователя

На рис. 25 приведены относительные градуировочные характеристики индуктивного преобразователя перемещений, полученные расчётным и экспериментальным путём. Исследовался преобразователь со следующими параметрами: l_c = 80 мм, $l_к$ = 50 мм, r = 4 мм, R = 6,75 мм, W = 1500. График 1 получен путём расчёта по предлагаемой формуле, а график 2 является экспериментальным. Для сравнения приводится график 3, рассчитанный по приведенному в [249] выражению для градуировочной характеристики.

Из графиков следует, что полученная зависимость более точно описывает реальную градуировочную характеристику. Заметные расхождения между расчётной характеристикой и экспериментальной наблюдаются при максимальном удалении сердечника от катушки, когда общая индуктивность катушки с сердечником мала и становится соизмеримой с собственной индуктивностью катушки без сердечника. Этот участок характеристики в реальных датчиках перемещений обычно не используется.

В пределах рабочего участка наблюдается хорошее совпадение расчётной по характеристики с экспериментальной, что обуславливает возможность уточнённого расчета чувствительности и диапазона измерения преобразователя при его проектировании. Недостатком выражения является его сложность и невозможность аналитического вычисления интеграла, входящего в формулу.

3.2. Оптимизация конструктивной схемы преобразователя

Выражение для градуировочной характеристики позволяет оценить влияние конструктивных параметров преобразователя на его метрологические характеристики. С целью оптимизации конструкции индуктивного измерительного преобразователя соленоидного типа исследуем его градуировочную характеристику. Преобразуем выражение градуировочной характеристики с использованием относительных величин. Поскольку определяет характеристики преобразователя в первую очередь длина катушки, то возьмем эту величину за базовую и введем относительные величины

$$\chi = x/p_k\,;\ \delta = y/p_k\,;\ \rho = R/p_k\,;\ \alpha = p_c/p_k\,;\ dy = p_k \cdot d\delta.$$

С учетом относительных величин выражение для градуировочной характеристики преобразуется к следующему виду

$$Z = K \cdot \lambda(\chi),$$

$$K = \mu_a \frac{\pi r^2 W^2}{16 p_k}\left[\gamma \cdot \mu_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2 + j\omega\left(1 - \varepsilon_a \mu_a\left(\frac{\omega r}{2}\right)^2\right)\right],$$

$$\lambda(\chi) = \int_{-\alpha}^{\alpha}\left[\frac{1+\chi-\delta}{\sqrt{(1+\chi-\delta)^2+\rho^2}} - \frac{1-\chi+\delta}{\sqrt{(1-\chi+\delta)^2+\rho^2}}\right]^2 d\delta,$$

где ω - частота тока питания преобразователя.

Полученное выражение не учитывает собственных характеристик катушки при отсутствии сердечника. При учете этих характеристик выражение для полного сопротивления преобразователя примет вид

$$Z_p = Z + R_o + j\omega L_o,$$

где R_0 - сопротивление обмотки преобразователя; L_0 - собственная индуктивность обмотки преобразователя при отсутствии сердечника.

Недостатком полученного выражения градуировочной характеристики является его интегральная форма. Интеграл не может быть вычислен в элементарных функциях. Поэтому воспользуемся методом численного анализа для исследования особенностей градуировочной характеристики и возможностей улучшения метрологических характеристик индуктивного преобразователя.

На основе анализа конструкций значительного числа индуктивных измерительных преобразователей и датчиков было установлено, что, в основном, геометрические характеристики преобразователя соответствуют следующим границам значений параметров $\alpha = 1..10, \rho = 0,1..5$. Примем эти значения за основу при исследовании градуировочной характеристики.

Параметры α и ρ - это основные конструктивные параметры преобразователя, определяющие характер его градуировочной характеристики. Исследование влияния этих параметров на градуировочную характеристику представляет значительный интерес. Исследования были выполнены с использованием математической системы Maple.

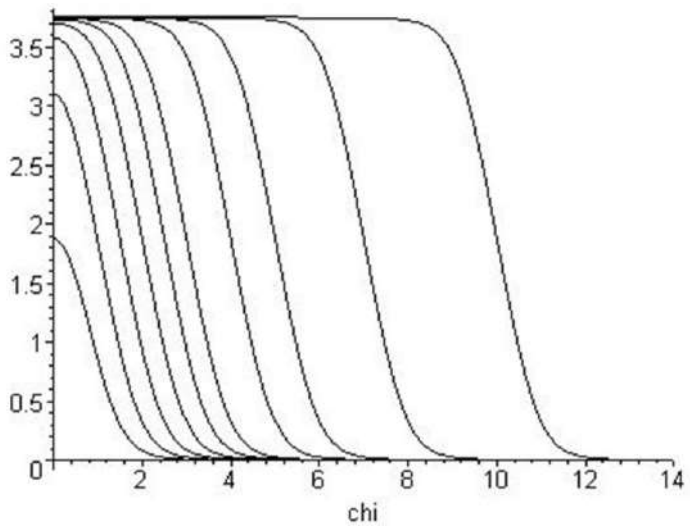


Рис. 26. Влияние параметра α

На рис. 26 приведены расчетные зависимости градуировочной характеристики $\lambda(\chi)$ для преобразователя с параметром $\rho = 1$ при изменении параметра α в пределах от 0,5 до 10. Из графиков можно видеть, что при $\alpha \geq 3$ (длина сердечника в три раза больше длины катушки, а средний диаметр катушки равен ее длине) вид характеристики от длины сердечника не зависит, а при увеличении длины сердечника характеристика смещается. При этом максимум чувствительности преобразователя (наибольший наклон градуировочной характеристики) наблюдается при относительном смещении сердечника $\chi = \alpha$.

С использованием описанного подхода были выполнены исследования параметров α и ρ, что позволило составить табл. 6.

Таблица 6

Относительный радиус катушки, ρ	0,25	0,5	1,0	2	3	4	5
Относительная пороговая длина сердечника, $\alpha_п$	1,25	1,5	2,2	4,0	6,0	8,0	10,0
Соотношение длины сердечника и радиуса	5	3	2,2	2	2	2	2

Таким образом, для полной реализации возможностей индуктивного измерительного преобразователя необходимо соблюдение следующих соотношений между средним диаметром D_k катушки преобразователя, длиной l_k катушки и длиной l_c сердечника:

- при $D_k \geq 2l_k - l_c \geq 2D_k$;
- при $D_k \leq 0{,}5l_k - l_c \geq 1{,}5D_k$;
- при $0{,}5l_k < D_k < 2l_k - 1{,}5l_k \leq l_c \leq 4l_k$ или $3D_k \leq l_c \leq 2D_k$;

Соблюдение этих простых рекомендаций при конструировании индуктивного измерительного преобразователя соленоидного типа позволит обеспечить наибольший диапазон изменения выходной величины преобразователя, возможный при принятых размерах катушки.

Представляет интерес исследование влияния на характеристики преобразователя изменения относительного радиуса катушки ρ. Пример расчета градуировочной характеристики системы катушка-сердечник с $\alpha = 3$ при изменении относительного радиуса катушки в пределах 0,1..5,0 приведен на рис. 27.

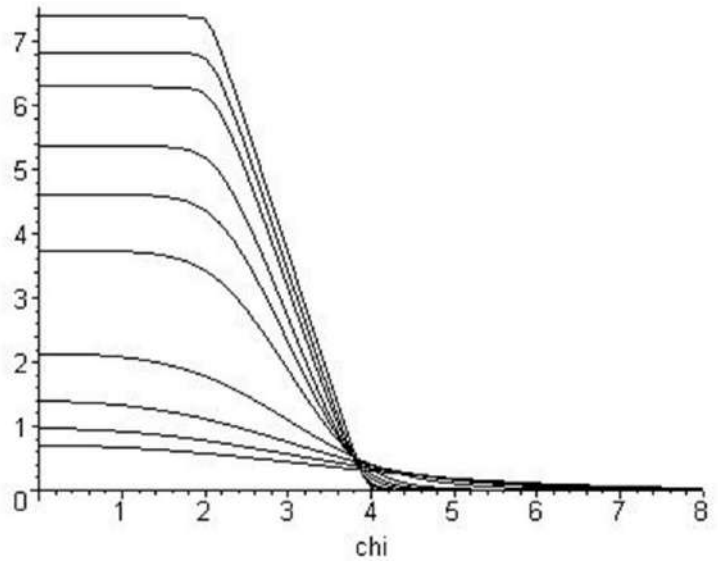


Рис. 27. Влияние относительного радиуса катушки

Можно видеть, что при уменьшении относительного радиуса наклон характеристики (чувствительность преобразователя) возрастает. Следовательно, с точки зрения повышения чувствительности преобразователя целесообразно использовать относительно тонкие катушки.

Участок существенного изменения выходной величины преобразователя при перемещении сердечника

укладывается в пределы ±1, т.е. соответствует перемещению равному длине катушки. Точка наибольшей чувствительности соответствует перемещению сердечника $\chi = \alpha$.

При $\rho > 1$ чувствительность преобразования существенно уменьшается, градуировочная характеристика приобретает более плавный характер и несколько увеличиваются пределы активного участка характеристики (участок, соответствующий существенному изменению выходной величины).

Таким образом, можно рекомендовать при конструировании преобразователя ограничивать относительный радиус катушки величинами $\rho = 0{,}1..0{,}5$. При этом рабочая точка характеристики преобразователя будет соответствовать смещению сердечника $\chi = \alpha$, а активный участок характеристики иметь протяженность близкую к длине катушки. Изменение выходной величины преобразователя в пределах активного участка при этом будет обеспечено в 5..7 раз.

Таким образом, выполненный анализ позволяет сделать следующие рекомендации для конструирования индуктивного измерительного преобразователя с оптимальными метрологическими характеристиками

- $\rho = 0{,}1..0{,}5$ или $D_k = (0{,}1..0{,}5) l_k$,
- $\alpha \geq 1{,}5$ или $l_c \geq 1{,}5 l_k$.

Эскиз системы "катушка - сердечник" оптимизированного с точки зрения градуировочной характеристики индуктивного преобразователя соленоидного типа приведен на рис. 28.

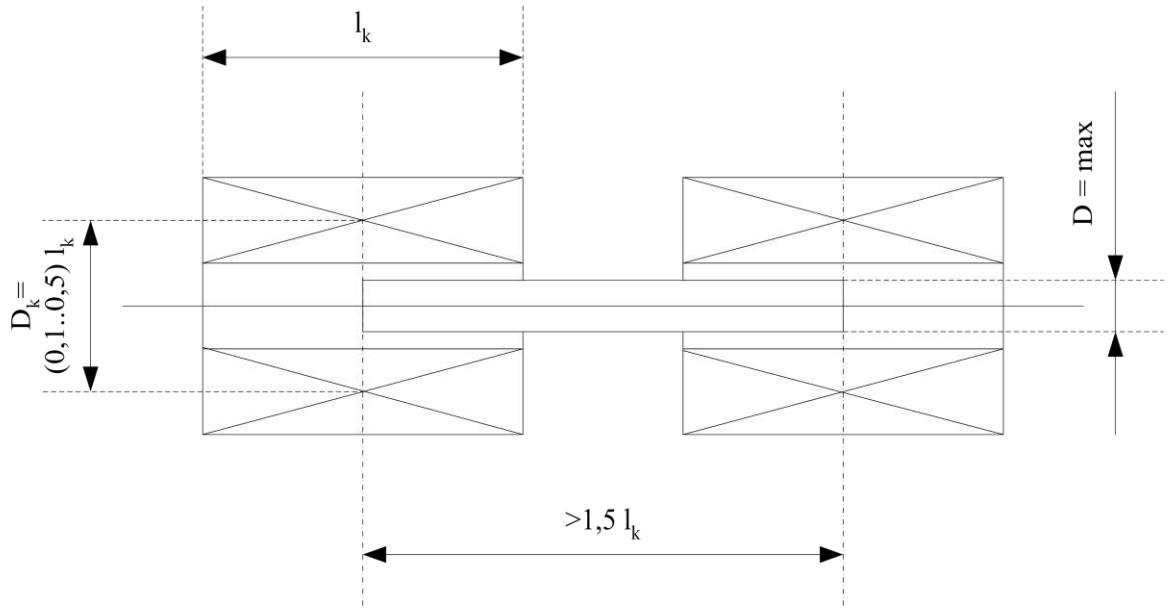


Рис. 28. Оптимальное соотношение размеров преобразователя

3.3 Магнитная проницаемость разомкнутого сердечника

При расчете магнитных цепей, имеющих немагнитные зазоры или разомкнутую форму (например, при расчете индуктивных измерительных преобразователей), во внимание необходимо принимать эффективную магнитную проницаемость магнитопровода с учетом его формы. При этом необходимо учитывать размагничивание разомкнутого магнитопровода (сердечника).

Эффективная магнитная проницаемость магнитопровода конкретной формы зависит от его размагничивания и может быть определена следующим образом

$$\bar{\mu}_{\text{c}} = \frac{\mu_c}{1+N(\mu_c-1)} \quad ,$$

где μ_c – магнитная проницаемость материала магнитопровода, N – коэффициент размагничивания магнитопровода.

При определении эффективной магнитной проницаемости существенным становится вопрос о коэффициенте размагничивания магнитопровода. Эта величина может быть точно рассчитана только для магнитопроводов, имеющих форму эллипсоида, что редко встречается на практике. Для стержневых образцов определение коэффициента размагничивания производится приближенно для ограниченного числа форм либо на основе эксперимента, либо на основе приближенных зависимостей [194,195]. Во всех случаях расчеты дают значительное расхождение полученных значений и в литературе отсутствуют сведения об экспериментальной проверке предлагаемых расчетных выражений.

Нами был выполнен анализ ряда литературных источников по коэффициенту размагничивания стержневых образцов и проведено экспериментальное исследование коэффициента размагничивания.

Эффективная магнитная проницаемость сердечника с учетом размагничивания равна

$$\bar{\mu}_{\text{c}} = \frac{B}{H_e},$$

где H_e=H_i+H_p - напряженность внешнего магнитного поля,

H_p – напряженность размагничивающего поля,

H_i - напряженность внутреннего магнитного поля,

$$H_i = \frac{H_e}{1+N(\mu_c-1)},$$

μ_c - магнитная проницаемость материала сердечника.

Сравнивая магнитную проницаемость материала, из которого выполнен сердечник, и магнитную проницаемость сердечника определенной формы, можно определить коэффициент размагничивания сердечника

$$N = \frac{\mu_{\text{c}}-\bar{\mu}_{\text{c}}}{\bar{\mu}_{\text{c}}(\mu_{\text{c}}-1)}.$$

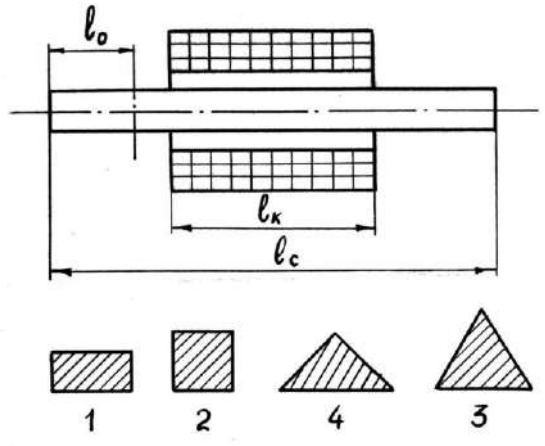


Рис. 29. Образцы для исследований

Экспериментальное исследование коэффициента размагничивания стержневых сердечников производилось путем регистрации кривых намагничивания осциллографическим методом. Магнитная проницаемость материала образца определялась на тороидальных образцах из того же материала (Федотов А.В. Установка для осциллогра-фирования динамических кривых намагничивания. Приборы и техника эксперимента. № 1, 1978. с. 175-178).

На рис.29 показаны примеры исследованных стержней. Все стержни имели одинаковую площадь s_c поперечного сечения и одинаковую длину. Относительная длина λ для нецилиндрических образцов определялась из выражения

$$\lambda = \frac{l_c}{d_э} = l_c\sqrt{\frac{\pi}{4s_c}}.$$

Результаты определения коэффициента размагничивания для разных сечений образцов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Образец	λ	$\frac{l_o}{l_c}$	N_{pp}			δ%	
			Расчет	Эксперимент			
				μ_c= 440	μ_c= 260	μ_c= 440	μ_c= 260
1	20,6	0,015 0,25 0,50	- - 0,00529	0,03318 0,00819 0,00639	0,03012 0,00661 0,00512	- - -17	- - 3,0
2	20,9	0,018 0,25 0,50	- - 0,00516	0,03379 0,00747 0,00588	0,02972 0,00625 0,00500	- - -12	- - 3,2
3	20,96	0,014 0,26 0,50	- - 0,00514	0,03379 0,00740 0,00537	0,02878 0,00585 0,00441	- - -4,3	- - 17
4	21,5	0,019 0,25 0,50	- - 0,00493	0,03073 0,00689 0,00549	0,02545 0,00535 0,00454	- - -10	- - 9,0

Расхождение	0,0165	-	6,5%	10,8%	-	-
	0,25	-	9,4%	11,1%	-	-
	0,50	-	10,5%	7,5%	-	-

На основе оценки результатов измерения коэффициента размагничивания в каждом сечении образцов разной формы можно видеть, что наибольшее расхождение не превосходит 12% относительно среднего значения и, следовательно, форма поперечного сечения образца не оказывает существенного влияния на его коэффициент размагничивания. С другой стороны, коэффициент размагничивания существенно изменяется по длине стержней, резко возрастая к концам стержня. Значения коэффициента размагничивания в центре и на концах стержня отличаются более чем в 4 раза по отношению к значению коэффициента в среднем сечении.

Таблица 8

λ	$\frac{l_o}{l_c}$	N_{pp}	λ	$\frac{l_o}{l_c}$	N_{pp}
2,90	0,06	0,169	2,38	0,07	0,157
	0,11	0,131		0,14	0,151
	0,16	0,126		0,20	0,118
	0,21	0,117		0,26	0,119
	0,26	0,102		0,33	0,115
	0,31	0,104		0,39	0,114
	0,36	0,100		-	-
	0,41	0,097		0,45	0,107
	0,46	0,097		-	-
1,75	0,09	0,160	15,9	0,03	0,0345
	0,18	0,162		0,09	0,0181
	0,27	0,163		0,16	0,0130
	0,36	0,160		0,32	0,0095
	0,45	0,160		0,50	0,0088

В табл. 8 приведено распределение коэффициента размагничивания по длине цилиндрических стержней раз-ной относительной дли-ны. Значения коэффициента размагничива-ния в среднем сечении стержня и в крайнем сечении отличаются более чем в два раза.

Обработка результатов эксперимента позволила вывести эмпирическую зависимость для распределения коэффициента размагни-чивания по длине стержня

$$K = \frac{N_i}{N_{05}} = 0.859\left[\left(\frac{l_o}{l_c}\right)^{-0.147\lambda^{0.441}} - 0.5^{-0.147\lambda^{0.441}}\right] + 1,$$

где N_i -коэффициент размагничивания в текущем сечении стержня,

N_{05} - коэффициент размагничивания в среднем сечении стержня,

λ - относительная длина стержня.

Наибольшая наблюденная погрешность формулы не превосходит 40% в пределах λ = 1,75...16, что при расчете индуктивного измерительного преобразователя можно считать удовлетворительным.

Таблица 9

λ	$\frac{l_к}{l_c}$	Npp		δ %
		Эксп.	Расч.	
15,9	-	0,0083	0,0076	- 8,6
	0,7	0,0086	0,0100	16,3
	0,5	0,0122	0,0111	- 9,0
	0,3	0,0168	0,0137	-18,0
	0,09	0,0307	0,0312	2,0
9,13	1,19	0,0192	0,0208	8,4
	0,85	0,0213	0,0222	4,0
	0,50	0,0279	0,0258	- 7,5
	0,16	0,0462	0,0466	0,9
1,19	9,21	0,2238	0,2481	11,0
	1,22	0,373	0,285	-24,0
1,75	6,25	0,1492	0,1609	8,0
	0,83	0,2613	0,1973	-25,0
2,38	4,61	0,1049	0,1123	7,0
	0,61	0,2013	0,1478	-27,0
2,88	3,80	0,0864	0,0894	3,5
	0,50	0,1728	0,1243	-28,0

Приведенные выше данные получены для намагничивания стержней в практически однородных магнитных полях. На практике, например, для индук-индуктивных измерительных преобразователей, сердечник, как правило, намагничивается в катушке, длина $l_к$ которой соизмерима с длиной сердечника l_c.

В табл. 9 приведены данные исследования коэффициента размагничивания цилиндрических стержней разной относительной длины λ в катушках разной длины. Соотношение $l_к/l_c=\infty$ означает, что намагничивание производилось в однородном поле. Коэффициент размагничивания определялся в среднем сечении сердечника. Из табл. 9 можно видеть существенную зависимость значения коэффициента от неоднородности поля намагничивающей катушки. Чем короче намагничивающая катушка и, следовательно, неоднороднее намагничивающее поле, тем значительнее возрастает коэффициент размагничивания.

Обработка полученных экспериментальных данных, а также данных, приведенных в фундаментальном труде Р. Бозорта (Р. Бозорт Ферромагнетизм. М.: Ил, 1956) дает следующую эмпирическую зависимость для расчета коэффициента размагничивания в среднем сечении стержневого образца:

$$N_{pp} = 948.6\left[1 + 0.211\left(\frac{l_к}{l_c}\right)^{-1.116}\right] \cdot e^{(-8.074\cdot\lambda^{0.1353})},$$

где $\lambda = l_c\sqrt{\frac{\pi}{4s_c}} = \frac{l_c}{d_э}$,

$d_э$ – эквивалентный диаметр призматического образца или диаметр цилиндрического образца.

В таблицах 7 и 9 наряду с экспериментальными значениями коэффициента размагничивания приведены расчетные значения по предлагаемой формуле. Можно видеть удовлетворительное совпадение результатов.

Результаты расчетов по предложенной формуле также сравнивались со значениями, приводимыми Р. Бозортом в цитированном выше труде и с результатами расчетов по формулам, предложенным для коэффициентов размагничивания цилиндров И.А. Ушаковым (Ушаков И.А. О намагничивании образцов конечной длины. Сб. Радиоизмерения. Вып.9. М.: Изд-во стандартов, 1973). При расчетах магнитная проницаемость принята равной 1000. Результаты сравнения приведены в табл. 10.

В таблице приведены значения коэффициента размагничивания и относительное расхождение результата расчета (в %) с данными Р. Бозорта. Результаты достаточно близки, что говорит об их объективности. При этом предлагаемая формула дает несколько более точный результат по сравнению с формулами И.А. Ушакова, для которых точность существенно падает при увеличении относительной длины цилиндрического стержня.

Таблица 10

λ	1	2	5	10	20	50	100
Бозорт Р.	0,27	0,14	0,040	0,0172	0,00617	0,00129	0,00036
N_{pp}	0,30587	0,13829	0,04290	0,01599	0,00541	0,00109	0,00028
δ %	-13,3	1,2	-7,3	7,0	12,3	15,2	21,0
Ушаков И.А.	0,25386	0,13205	0,04231	0,01522	0,00491	0,000865	0,000089
δ %	5,9	5,7	-5,8	11,5	20,5	33,2	75,1

Таким образом, при выполнении расчетов индуктивных преобразователей с разомкнутым сердечником (в первую очередь соленоидных преобразователей) предложенная формула вполне применима. В целом результаты исследований показали слабую зависимость коэффициента размагничивания стержневого сердечника от формы его поперечного сечения. Для призматических стержней можно использовать значения коэффициента размагничивания цилиндрических стержней. Коэффициент размагничивания стержневого сердечника существенно изменяется по длине сердечника, это изменение может быть оценено по приводимой эмпирической формуле.

Выводы

1. В известных работах по теории и расчету индуктивных измерительных преобразователей отсутствует оценка требований к преобразователю в зависимости от условий его применения с комплексным учетом метрологических характеристик преобразователя в динамике.

2. Характерен подход к индуктивному измерительному преобразователю как к разновидности электромагнитного устройства без достаточного учета метрологического назначения преобразователя.

3. Приводимые математические описания преобразователя не образуют его полную метрологическую модель, позволяющую увязать метрологические и конструктивные характеристики преобразователя, что ограничивает возможности математического моделирования преобразователя и его оптимизации.

4. Теоретические исследования известных работ в основном базируются на методах исследования магнитных цепей, что существенно ограничивает применимость полученных результатов. При использовании этих методов метрологическая модель не может быть построена в окончательном и полном виде, аналитическое описание применимо для ограниченного числа разновидностей преобразователей, расчет статических метрологических характеристик производится со значительной погрешностью, а значение характеристик в динамике не определено.

5. Отсутствует единая обобщенная теория индуктивных измерительных преобразователей, базирующаяся на единстве их метрологического назначения и общих законах электромагнитного поля.

6. Целесообразно использовать классификацию индуктивных измерительных преобразователей, базирующуюся на учете используемых для преобразования проявлений электромагнитного поля и определяющую возможности использования для описания преобразователей тех или иных законов электромагнитного поля.

7. Для построения обобщенной теории индуктивных измерительных преобразователей необходимо:

- увязать требования к преобразователю с условиями его применения в конкретной системе,

- разработать элементы электромагнитной теории применительно к намагничиванию ферромагнитных тел в неоднородных полях и к магнитопроводам с переменным размагничивающим фактором;

- построить аналитическую метрологическую модель преобразователя, в явном виде связывающую комплекс его метрологических характеристик с конструктивными параметрами.

Библиографический список

1. Абдуллаев Я.Р. Индукционные датчики с подвижными экранами. - Изд. высш. учебн. заведений, Приборостроение, 1971. Том 14, № 2. С. 27-29.

2. Абдуллаев Я.Р. Исследование магнитных систем с подвижными электромагнитными экранами. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Московск. энергет. ин-т, 1969. - 266 л.

3. Абдуллаев Я.Р. Магнитные системы с подвижными экранами. Часть первая. Смоленск, Смоленск. Филиал МЭИ, 1972. - 64 с.

4. Абдуллаев Я.Р. Магнитные системы с подвижными экранами. Часть вторая. Основы теории и расчета магнитных цепей с подвижными экранами. МЭИ, 1973. - 128 с.

5. Абдуллаев Я.Р. Магнитные системы с распределенными параметрами и подвижными экранами. Часть третья. М., МЭИ, 1973. -64 с.

6. Абдуллаев Я.Р. Метод расчета выходной ЭДС датчиков с подвижными экранами. - Изд. высш. учебн. заведений, Приборостроение, 1973, Том 16, № 6. С. 9-13.

7. Абдуллаев Я.Р. Расчет электродинамических сил в магнитных системах с подвижными экранами. Часть четвертая. Смоленск, МЭИ, 1974. - 48 с.

8. Абдуллаев Я.Р. Электромагнитные устройства с индукционной подвеской. Смоленск, Смоленский филиал МЭИ, 1974. - 52 с.

9. Абдуллаев Я.Р., Гераськов В.Л., Расчет индуктивного датчика усилий с индукционной подвеской. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, том 18, № 1. С. 15-20.

10. Абламунец И.Г., Шатерников В.Е. Параметры вихретоковых преобразователей, расположенных под движущейся пластиной. - Дефектоскопия, 1977, № 1. С. 14-20.

11. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. М., Машиностроение, 1965. - 928 с.

12. Айзикович Б.В., Безъязыкова Т.Г., Алексеев А.Г. Взаимосвязь внутреннего размагничивающего фактора с магнитной проницаемостью эластичных магнитных материалов. - Дефектоскопия, 1974, № 6. С. 124-127.

13. Альтгаузен О.Н., Семенова Н.А., Степанова А.Н. О временном спаде магнитной проницаемости в магнитомягких сплавах. - В кн.: Прецизионные сплавы. Металлургиздат, М., 1962, вып. 25. С. 96-103.

14. Андриевский Е.А. К определению коэффициентов размагничивания постоянных магнитов. - В кн.: Проблемы технической электродинамики, республиканский сборник, 1974, вып. 49, с. 92-94.

15. Антипов Г.В., Волков Н.П. Некоторые вопросы построения высокочастотных индуктивных преобразователей с электромагнитным экранированием. - В кн.: Сборник научных трудов Ивановского энерг. ин-та, 1972, Вып. 23, с. 146-147.

16. Антонов В.Г., Чечурина Е.Н. Способы экспериментального определения коэффициентов размагничивания стержней. - В сб.: Исследования в области магнитных измерений. ВНИИМ, 1974, вып. 152(212), с. 120-129.

17. Аркадьев В.К. О размагничивающем факторе. - В сб.: Униполярные машины и применение постоянных магнитов в электромашиностроении. АН СССР. 1940.

18. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1-2, М. - Л., ОНТИ, 1935, 230 с.

19. Асташевская Т.С. Расчет индуктивных преобразователей перемещений информационно-измерительных систем. - Измерительная техника, 1978, № 4, с. 12-14.

20. Асташевская Т.С. Расчет трансформаторного преобразователя угла. - Изд. высших учебн. заведений, Приборостроение, 1977, № 9, с. 10-15.

21. Асташевская Т.С. Расчет трансформаторных преобразователей перемещений с бесконечным сопротивлением нагрузки. - Изд. высш. учебн. заведений, Приборостроение, 1975, Том 18, № 5, с. 60-63.

22. Асташевская Т.С., Хрипаченко Е.В. Расчет на ЭЦВМ трансформаторного преобразователя перемещений с подвижной обмоткой. - Метрология, 1979, № 5, с. 44-48.

23. Аширов В.К. Исследование и разработка магнитомодуляционных преобразователей перемещений во временной интервал. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышев. политехн. ин-т, 1970, 144 л.

24. Белов П.В. Расчет индуктивных преобразователей соленоидного типа. - Труды ВНИИ цементного машиностроения, вып. 14, 1972, с. 117-126.

25. Белов П.В. Расчет переходного процесса мостового трансформаторного фазопреобразователя. - Труды ВНИИ цементного машиностроения, 1973, вып. 15, с. 56-60.

26. Белоглазов Ю.Г., Аксаментов Л.Г. Исследование бесконтактного индуктивного преобразователя перемещений. - В сб.: Автоматическое производство и контроль в машиностроении. Омск, 1974, с. 88-93.

27. Белый М.И. Вопросы теории, расчета и проектирования электромагнитных измерительных преобразователей с нелинейной магнитной цепью и распределенными параметрами. Диссертация на соиск. ученой степ. докт. техн. наук. Ульяновск, Ульяновск. политехн. ин-т, 1969, I кн. 300 л., II кн. 122 л.

28. Белый М.И. Электромагнитные измерительные преобразователи с распределенными параметрами. Ульяновск, Ульяновск. гос. жд. ин-т, 1968, 325 с.

29. Белый М.И., Корнилов В.В. Магнитные материалы измерительных преобразователей. Ульяновск, Приволжское книжн. издат., Ульян. отд-ние, 1967, 105 с.

30. Белый М.И., Туль М.П. Электромагнитные преобразователи с распределенными параметрами. - Издат-во Саратовского ун-та, 1976, 141 с.

31. Берендс Д.А. Расчет магнитной проводимости воздушных зазоров трансформаторного датчика угла. - В сб.: Приборы точной механики и технология приборостроения. М.: ВЗМИ, 1972, вып. 2, с. 55-62.

32. Беркман Р.Я., Федотов В.М. Влияние магнитных наводок на входные трансформаторы измерительных устройств. - Измерительная техника, 1966,№ 10, с. 58-60.

33. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа, 1964, 750 с.

34. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М., Энергия, 1970.

35. Бовсуновский Я.И. Индуктивные датчики для механизации и автоматизации контрольных операций в машиностроении и приборостроении. Киев, Киевск. дом научно-техн. пропаг., 1964, 42 с.

36. Богданова Н.А. Разработка и исследование измерительных преобразователей с постоянными магнитами. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Уфа, Уфимск. авиац. ин-т, 1975, 150 л.

37. Бодяшкин А.И. Метод расчета магнитных полей. М., Наука, 1968, 53 с.

38. Борчанинов Г.С. О аналоговой модели поверхностного эффекта. Электричество, № 6, 1967.

39. Бромберг Э.М., Гольдман В.С. Автокорректирующийся индуктивно-частотный преобразователь линейных перемещений. - Автометрия, 1971, №2, с. 99-101.

40. Буль Б.К. К теории и расчету магнитных цепей и индукционных механизмов. - Диссерт. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. М., МЭИ, 1957, 393 л.

41. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М., Энергия, 1964, 464 с.

42. Буль Б.К. Основы теории электрических аппаратов. М., Высшая школа, 1970, 600 с.

43. Буль Б.К. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров для круглых и прямоугольных полюсов. М., Всесоюзн. заочн. энерг. Ин-т, 1961, 51 с.

44. Буль Б.К. Расчет магнитных цепей методом пассивного четырехполюсника. М., Моск. энергет. ин-т, 1966, 40 с.

45. Буль Б.К., Азанов В.А. Расчет индукционного преобразователя угла с учетом поля выпучивания. - Измерительная техника, 1974, № 12, с. 67-69.

46. Буль Б.К., Соколов В.П. Расчет индукционного преобразователя с подвижной сигнальной катушкой. - Измерительная техника, 1970, № 5, с. 67-71.

47. Бурцев Г.А. Исследование зависимости центрального коэффициента размагничивания ферромагнитных пластин от их намагниченности. - Дефектоскопия, 1970, № 1, с. 49-54.

48. Бурцев Г.А. Расчет коэффициента размагничивания цилиндрических стержней. - Дефектоскопия, 1971, № 5 ,с. 20-31.

49. Ветряк В.И., Сергеев В.И. Индуктивный частотный преобразователь с повышенной линейностью характеристики. - Изд. высш. учебн. заведений, Приборостроение, 1972, Том 15, № 5, с. 27-31.

50. Виноградов Ю.Д., Машинистов В.М., Розентул С.А. Электронные измерительные системы для контроля малых перемещений. М., Машиностроение, 1976, 144 с.

51. Волосов В.Е. Некоторые проблемы расчета на ЭЦВМ электромагнитных полей рассеяния. - В кн.: Вестник Харьковского политехн. ин-та, №103, Автоматика и приборостроение, вып. 2, 1975, с. 19-21.

52. Востриков Ю.Я. Обеспечение функциональной взаимозаменяемости первичных и вторичных приборов в дистанционной дифференциально-трансформаторной измерительной системе. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., НИИТеплоприбор, 1972, 248 л.

53. Выгода Ю.А., Волков В.А. Динамика работы дифференциальных схем индуктивного и емкостного преобразователей малых перемещений. - Известия ВУЗов, Приборостроение. Т. 15, 1972, № 7, с. 13-16.

54. Высокотемпературные электромагнитные преобразователи перемещений, В.Е. Шатерников, И.А. Лиманов, М.А. Абаимов, В.П. Курозаев. - В кн.: УШ Всесоюзная научно-техническая конференция по неразрушающим физическим методам и средствам контроля. Часть II/б/, Кишинев, 1977, с. 409-412.

55. Высоцкий А.В., Гринштейн Б.Я., Розентул С.А.Комплекс электронных средств для измерения линейных размеров в машиностроении. - Измерительная техника, 1976, ; 11, с. 16-18.

56. Габриэлян Д.И., Логвинов П.К., Смирнова Л.Г. Влияние поперечных сжимающих напряжений на магнитные свойства магнитомягких материалов. - В кн.: Прецизионные сплавы. Металлургиздат, М.,1962, вып. 25, с. 86-95.

57. Гераськов В.Л. Преобразователи перемещений и усилий на принципе индукционной подвески. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., МЭИ, 1975, 278 л.

58. Гинзбург В.Г. Магнитоупругие датчики. М.: Энергия, 1970. - 71 с.

59. Гинзбург П.Б. Выбор и исследование свойств материалов для магнитоупругих датчиков усилий. - Приборы и системы управления, 1975, № 2, с. 16-18.

60. Гладков Э.А. Расчет электромагнитных экранов датчиков механических перемещений. - Приборы и системы управления, 1971, № 6, с. 26-27.

61. Глузман П.Л. Исследование индукционных функциональных преобразователей как элементов информационно-измерительных приборов. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский политехн. ин-т, 1970, 195 л.

62. Гринштейн Б.Я. Гамма унифицированных электронных измерительных устройств с индуктивными преобразователями. - В сб.: Методы и средства измерений для обеспечения качества продукции. М., Издат. Стандартов, 1979, с. 28-33.

63. Гринштейн Б.Я. Исследование и разработка электронной системы с индуктивными преобразователями для линейных размеров. Диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., Мосстанкин, 1980, 192 л.

64. Гринштейн Б.Я., Сон . Малогабаритные электронные отсчетные устройства с индуктивными датчиками. - Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент. Научн.-техн. реф. сб. (НИИМАШ), 1970, вып. 7, с. 13-16.

65. Гусев В.Г., Андрианова Л.П. Анализ магнитной цепи бесконтактного индуктивного преобразователя. - Известия ВУЗов, Приборостроение. 1974, том 17, №2, с. 20-24.

66. Гусев В.Г., Лихтциндер Б.Я. Трансформаторные преобразователи перемещения с корректирующими усилителями. - Приборостроение, труды Уфимского авиац. ин-та, Уфа, 1973, вып. 62, с. 31-39.

67. Давыдов Е.Г. Исследование индуктивного микрометра. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Мосстанкин, 1948, 198 л.

68. Дадашева Р.Б. Исследование температурной погрешности индуктивных преобразователей. Диссертац. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. НИПИ по комплексной автоматизации нефтяной и химической промышленности, Сумгаит, 1972.

69. Демирчян К.С. О аналоговой модели поверхностного эффекта. Известия ОТН СССР, Транспорт и энергетика, 1963.

70. Дианов В.Г. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы химических производств. М., Химия, 1973, 328 с.

71. Дмитриев Е.И. Измерение малых перемещений индуктивным методом. М. - Л., Изд. АН СССР, 1945, 120 с.

72. Дорофеев А.Л. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия. М.: Машиностроеение, 1967.

73. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Васютинский Н.Н. Расчет параметров однообмоточного и двухобмоточного электроиндуктивных датчиков. / Промышленное применение электромагнитных методов контроля. М., Московский ДНТП, 1974, с. 16-24.

74. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. М.: Энергия, 1969. - 152 с.

75. Едуш В.Я. Вопросы расчета и конструирования индуктивных преобразователей с подвижным короткозамкнутым витком. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Сумгаит, Научн.-исслед. и проектный ин-т по комплексной автоматизации в нефт. и хим. пром-сти, 1963, 203 л.

76. Жиров В.Г. Исследование магнито-модуляционных функциональных преобразователей перемещения. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбыш. политех. ин-т, 1970, 140 л.

77. Жиров В.Г. Расчет магнитомодуляционного измерительного преобразователя перемещения с постоянным магнитом. - В кн.: Техническая кибернетика. Межвузовский сборник научных трудов. Куйбышев, 1974, с. 131-135.

78. Зайцев Ю.А., Катюк А.Ф. Влияние магнитного поля на работу магнитомодуляционных преобразователей с замкнутой системой. - Измерительная техника, 1974, № 5 , с. 44-45.

79. Зарипов М.Ф. Преобразователи с распределенными параметрами для автоматики и информационно-измерительной техники. М., Энергия, 1969, 177с.

80. Зарипов М.Ф. Теория длинных магнитных линий и преобразователей с распределенными электромагнитными параметрами применительно к устройствам информационно-измерительной техники. Диссерт. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. Ташкентский политехн. ин-т, Ташкент, 1968.

81. Зарипов М.Ф., Генне М.И., Хоботиев А.А. Индуктивный датчик больших линейных перемещений со смещаемой статической характеристикой. - Труды Ташкентского политехнического ин-та, 1973, вып. 93, с. 108-110.

82. Зарипов М.Ф., Лиманов И.А. Индуктивные датчики с улучшенными метрологическими характеристиками. Уфа, Уфимск. авиац. ин-т, 1974, 125 с.

83. Зарипов М.Ф., Лиманов И.А. Расчет магнитных и электрических параметров функционального индуктивного преобразователя. - Измерительная техника, 1975, № 8, с. 76-77.

84. Зарипов М.Ф., Лиманов И.А., Генне М.И. Методы улучшения метрологических характеристик индуктивных датчиков перемещения. - В кн.: Элементы информационно - измерительных устройств. АН СССР, Башкирский филиал. Отдел физики и математики, Уфа, 1976, с. 3-13.

85. Зарипов М.Ф., Уракеев М.А. Функциональные преобразователи перемещения. М., Машиностроение, 1976, 133 с.

86. Зарипов М.Ф., Ураксеев М.А. Определение удельного магнитного сопротивления материала магнитопровода. - Известия ВУЗов, Приборостроение, том 17, 1974, №12, с. 25-27.

87. Зарипов М.Ф., Фикс-Марголина И.Г., Генне М.И. К расчету потокосцепления в стержневых и цилиндрических конструкциях магнитопровода с учетом нелинейности кривой намагничивания. - Сборник материалов по итогам научно-исследовательских работ инженерно-физического факультета ТашПИ, 1973, вып. 106, с. 50-54.

88. Зацепин Н.Н., Шапоров Б.Д. Нелинейные процессы в ферромагнетике, перемагничиваемом продольным переменным полем. - В кн.: Физика неразрушающего контроля. Минск, АН БССР, 1974. с. 97-114.

89. Ибрагимов Э.У. Разработка и исследование магнитомодуляционных датчиков перемещения. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Ташкент, Ташкентск. политехн. ин-т, 1972, 162 л.

90. Иванов В.П., Кадочников А.И., Леонов В.В. Расчет вихревых токов в стержнях с различными профилями поперечного сечения. - Дефектоскопия, 1973, №4, с.101-110.

91. Иванов В.П., Передельский Г.И. Измерение параметров индуктивных датчиков. - В кн.: Вычислительная техника, радиотехника, магнитные материалы. Ч. 1, 1974, с. 145-148.

92. Иванова И.И. О влиянии температуры на магнитный поток измерительных приборов и метод уменьшения этого влияния. - Труды ин-та физики металлов. Вып. 15, АН СССР, Уральский филиал, М., 1954.

93. Измерения в промышленности. Справочник. /Под ред. П. Профоса. - М., Металлургия, 1960, 648 с.

94. Иоффе А.И. Повышение линейности характеристики дифференциально-трансформаторных преобразователей перемещений с переменной длиной воздушного зазора. - Измерительная техника, 1970, № 10, с. 85-86.

95. Иоффе А.И. Расчет температурной погрешности дифференциально-трансформаторных преобразователей давления. - Измерительная техника, 1971, №3, с. 31-33.

96. Иоффе А.И., Черейский П.М. К проектированию теплостойких трансформаторных преобразователей перемещений. - Приборы и системы управления. 1974, № 11, с. 29-31.

97. Иоффе А.И., Черейский П.М. Повышение линейности трансформаторного преобразователя перемещений. - Приборы и системы управления, 1975, № 5, с. 25-26.

98. Ислиев Э.Г. Расчет направленных графов сложных магнитных цепей на ЭЦВМ. - Известия ВУЗов, Энергетика, 1979, №11, с. 99-102.

99. Исследование магнитных характеристик конструкционных сталей. А.И. Макаров, В.А. Кораблев, Г.Г. Кревский, Н.Д. Тютева. - Труды Тюменского индустриального ин-та. 1973, вып. 13, с. 109-111.

100. Исследование характеристик датчиков тока для релейной защиты с сердечниками из магнитодиэлектриков. Ю.Г. Жуковский, И.И. Калинин, В.В. Михайлов, В.А. Мичурин. - Изд. высш. учебн. заведений, Электромеханика, 1978, № 1, с. 100-103.

101. К вопросу расчета выходного напряжения индукционного преобразователя перемещений с электрической редукцией. А.Т. Артамонов, К.Е. Берлин, Н.П. Волков, С.Т. Мартиросян. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, №11, с. 22-26.

102. Кадырова Ш.А. Разработка и исследование ферродинамических измерительных преобразователей с расширенным диапазоном перемещения подвижной части. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Ташкент, Ташкентский политехн. ин-т, 1975, 139 л.

103. Капитонова Л.М., Компанец В.К., Старобинский Н.М. Влияние геометрических размеров сердечников на чувствительность магнитно-транзисторных инверторов. - В кн.: Автоматические измерительные и регулирующие устройства. Куйбышевский авиац. институт, 1974, Вып. 7, с. 131-135.

104. Карпов А.М., Нэмени Т.М. Численный метод расчета магнитных полей с помощью исключения внутренних точек области. - Известия ВУЗов АН СССР, Энергетика и транспорт, 1978, №3, с. 160-165.

105. Кербер В.Н., Крячко К.А. Измерители больших перемещений. - Записки Ленингр. с.-х. ин-та, 1969, 138, с. 83-86.

106. Кирюшин Г.Н. Разработка и исследование индуктивных преобразователей перемещений с совмещенными функциями как элементов агрегатных информационно-измерительных систем. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышев. политехн. ин-т, 1976, 188 л.

107. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М, Энергия, 1969, 360 с.

108. Клюев В.В. Измерение толщины стальных листов методом вихревых токов. - Измерительная техника, 1970, № 11, с. 33-35.

109. Княжицкий И.И., Рашкович М.П. Индуктивные проходные преобразователи в станках с программным управлением. М.:- К: Машгиз, 1962. - 115 с.

110. Ковалевский В.В. Разработка и исследование индуктивных измерительных устройств для дискретных процессов измерения размерных

параметров. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Омск, Омск. политех. ин-т, 1974, 252 л.

111. Коваленко А.П. О коэффициентах размагничивания ферромагнитных стержней . - Труды МВТУ. М., 1975, № 185, с. 84-96.

112. Кожухов В.А., Лещенко И.Г. Построение электромагнитных преобразователей в условиях действия размагничивающего поля. - Стандартизация и измерительная техника, 1977, № 3, с. 157-161.

113. Колесников К.Д. Исследование факторов, влияющих на эффективность цепей с индуктивными и взаимноиндуктивными преобразователями малых перемещений в установившемся режиме. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, 1960.

114. Кольцов А.А. Исследование трансформаторных преобразователей больших линейных перемещений. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский индустр. ин-т, 1958, 157 л.

115. Кондашевский В.В., Федотов А.В. Задачи и пути развития технического контроля размеров деталей в машиностроении. - В кн.: Технический контроль и методы проектирования в машиностроении. Омск, Омский политехнический институт, 1097, с. 3-7.

116. Кондрашова Л.А. Исследование и расчет малогабаритных индукционных датчиков перемещения. Диссерт. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. М., Московский энергет. ин-т, 1973.

117. Конюхов Н.Е. Разработка и исследование функциональных преобразователей для информационно-измерительных и счетно-решающих устройств. Диссертация на соиск. ученой степ. докт. техн. наук. Куйбышев, Куйбышевск. политехн. ин-т, 1973, 356 л.

118. Конюхов Н.Е. Электромеханические функциональные преобразователи. М., Машиностроение, 1977, 239 с.

119. Конюхов Н.Е., Карамян Л.М., Нерсесян В.Б. Трансформаторный преобразователь перемещения с регулируемой выходной характеристикой. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1974, № 1, с. 5-8.

120. Конюхов Н.Е., Карамян Л.М., Нерсесян В.Б. Трансформаторный функциональный преобразователь малых перемещений. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1974, т. 17, № 4, с. 17-19.

121. Конюхов Н.Е., Куликовский Л.Ф., Медников Ф.М. Трансформаторные преобразователи малых линейных перемещений повышенной точности. - Автометрия, 1967, № 1, с. 33-37.

122. Конюхов Н.Е., Куликовский Л.Ф., Шкляр Ф.Н. Трансформаторные преобразователи малых перемещений с функциональным выходом. - Приборостроение, 1966, № 8, с. 4-5.

123. Конюхов Н.Е., Никитин В.Г. О влиянии квадратурной составляющей на амплитудно-фазовые характеристики трансформаторных преобразователей перемещения. - Известия ВУЗов, Приборостроение. 1975, том 18, №3, с. 8-11.

124. Конюхов Н.Е., Никитин В.Г., Дубинин А.Е. К расчету электродинамических усилий трансформаторных преобразователей перемещения. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1974, № 2, с. 217-219.

125. Конюхов Н.Е., Шахмаян А.С. Определение передаточной функции трансформаторного преобразователя малых линейных перемещений. - Известия ВУЗов, Приборостроение. Т. II, 1968, № II, с. 22-24.

126. Коржук Г.К. Индуктивные трансформаторные преобразователи линейных перемещений. - Измерительная техника, 1972, №1, с. 27-28.

127. Корнеев Б.В. Разработка многоэлементных индукционных датчиков. - В кн.: Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. М., Московский дом научно-технической пропаганды, 1977, с. 26-30.

128. Косолапов А.М., Евсеев Д.В. Функциональный воздушно-трансформаторный преобразователь перемещений. - Приборы и системы управления, 1974, № 11, с. 28-29.

129. Кругликов В.А. Исследование прецизионных электромагнитных измерительных преобразователей с линейным перемещением подвижной части. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Владимир, Владимирск. политехн. ин-т, 1972, 165 л.

130. Крюченков В.В., Карташова А.Н. О термокомпенсации дифференциально связанных трансформаторных преобразователей. - Приборы и системы управления, 1975, № 5, с. 23-25.

131. Кудрин В.Н., Коробков О.В. К расчету магнитных потоков и напряжений поля горизонтального электрического диполя в проводящем полупространстве. -В сб.: Методы анализа и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей. М., МЭИ, 1979, вып. 432, с. 8-11.

132. Кузмичев Г.М., Москвичев Е.И., Моргунов Ю.И. Линеаризация характеристик измерительных преобразователей. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, № 11.

133. Кузовкин А.Б. Методика проектирования датчиков электромагнитного поля для проводящих сред. - В сб.: Методы анализа и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей. М., МЭИ, 1979, вып. 432, с. 61-64.

134. Куликовский Л.Ф. Индуктивные измерители перемещений и практика использования их в нефтяной промышленности. Диссерт. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. Ин-т автоматики и телемеханики АН СССР, М., 1950.

135. Куликовский Л.Ф. Индуктивные измерители перемещений. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961, 280 с.

136. Куликовский Л.Ф., Бровкин Л.А., Лихтциндер Б.Я. Автоматические приборы с бесконтактными компенсирующими преобразователями. М., Энергия, 1967, 128 с. (Библиотека по автоматике, вып. 25).

137. Куликовский Л.Ф., Жиров В.Г. Магнитомодуляционные измерительные преобразователи. М., Энергия, 1977, 87 с. (Библиотека по автоматике, вып. 571).

138. Куликовский Л.Ф., Зарипов М.Ф. Индуктивные преобразователи перемещения с распределенными параметрами. М. - Л., Энергия, 1966. 112 с.

139. Куликовский Л.Ф., Конюхов Н.Е., Медников Ф.М. Трансформаторные функциональные преобразователи с профилированными вторичными контурами. М., Энергия, 1971, 103 с.

140. Куликовский Л.Ф., Лихтциндер Б.Я., Гусев В.Г. Улучшение метрологических характеристик индукционных измерительных преобразователей. - Труды Ульяновского политехнического института. 1973, том. YII, вып.1, с. 3-12.

141. Куликовский Л.Ф., Нечаевский М.Л., Поцелуев Ю.П. Анализ потокораспределения в преобразователе силы. - Известия ВУЗов, Приборостроение. 1975, том 18, №3, с. 5-8.

142. Куликовский Л.Ф., Шкляр Ф.М., Конюхов Н.Е. К вопросу выбора оптимальных соотношений в трансформаторном преобразователе малых линейных перемещений. - Известия ВУЗов, Приборостроение, т. 10, 1967, № 4, с. 29-34.

143. Курганбаева С.Ю. Разработка и исследование измерительных преобразователей с распределенными параметрами и магниточувствительными элементами. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Ташкент, Ташкентский политехн. ин-т, 1974. 163 л.

144. Курозаев В.П., Костров Д.С., Полулех А.В. Расчет поля линейно-протяженного вихретокового преобразователя, расположенного между цилиндрами конечной толщины. - В кн.: Современные проблемы развития неразрушающего контроля изделий. НИКИМП, 1976, вып. 10, с. 3-8.

145. Лещев В.П. Методика расчета основных характеристик индукционного преобразователя. - Измерительная техника, 1978, № 7, с.71-73.

146. Лиманов И.А. Индуктивный преобразователь с токовихревым эффектом. - Измерительная техника, 1969, №7.

147. Лиманов И.А. Разработка и исследование индуктивных преобразователей перемещений с подвижным сердечником и экранами. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбыш. авиац. ин-т, 1972, 168 л.

148. Лиманов И.А., Капцов А.В., Никонов А.И. Электромагнитный преобразователь перемещений с распределенными параметрами. - В кн.: Элементы

информационно - измерительных устройств. АН СССР, отдел физики и математики, Уфа, 1976, с. 61-66.

149. Лифшиц Н.А. Приложение методов двойного графического и численного интегрирования нелинейных уравнений к определению законов распределения магнитного потока вдоль магнитопровода нейтральных электромагнитных механизмов. - Автоматика и телемеханика, 1940, № 2. С. 39 - 62.

150. Лихтциндер Б.Я., Гусев В.Г. Обобщенный анализ трансформаторных цепей с корректирующими усилителями. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1971, № 3.

151. Магнитные поля токовихревых датчиков различной конфигурации. А.М. Пашаев, З.З. Махмудов, М.Г. Шахтахтинский, А.А. Кулиев, Б.Г. Новрузов. - Известия АН Азерб. ССР, серия физико-технических и математических наук, 1976, № 4, с. 85-90.

152. Майстровский Л.Б. Исследование трансформаторных функциональных преобразователей с регулируемой выходной характеристикой как элементов малых информационных машин. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский политехн. ин-т, 1972, 164 л.

153. Макаров Т.А. Исследование и разработка приборов с трансформаторными преобразователями перемещения для контроля и измерения уровня жидких сред в открытых емкостях. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Новосибирск, Новосиб. электротехн. ин-т, 1973, 159 л.

154. Макаров Т.А. Трансформаторные преобразователи перемещения. - Автометрия, 1971, №2, с. 110-113.

155. Марьясин Е.И. Разработка и исследование широкопредельных индуктивных датчиков высокой чувствительности для измерения размерных параметров со вторичной системой цифровой информации. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Москва, Мосстанкин, 1964.

156. Мильштейн В.Н. Основы электрического расчета индуктивных измерителей малых перемещений. - Автоматика и телемеханика, 1940, № 2, с. 125-145.

157. Мильштейн В.Н. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах. М. - Л., Госэнергоиздат, 1960, 312 с.

158. Мишин В.И., Собор И.Б. Аппроксимация кривых намагничивания кубическими сплайнами. - Известия ВУЗов, Энергетика, 1978, №7, с. 123-126.

159. Моделирование полей для расчета погрешностей совмещенного электромагнитного датчика с распределенными параметрами. С.Ф. Рахматулин, М.Л. Ждановских, Е.В. Сыроежкин, М.В. Беляев, В.В. Черных, О. Турабов - В кн.: Элементы информационно-измерительных устройств с распределенными параметрами. АН СССР, Башкирский филиал, Отдел физики и математики. Уфа, 1976, с. 82-85.

160. Моисеев В.С. Исследование широкодиапазонных бесконтактных пневматических систем для линейных измерений в машиностроении. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Мосстанкин, 1970, 232 л.

161. Монастырский З.Я., Пуцыло В.И. Линеаризация характеристик первичных измерительных преобразователей в трансформаторных мостах. - В кн.: Контрольно-измерительная техника. Вып. 22, Респ. межвед. научн.-техн. сборник. Высшая школа, Изд-во при Львовск. ун-те, Львов, 1977, с. 48-53.

162. Морев В.В. Трансформаторные датчики линейных перемещений с постоянной магнитной цепью. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский индустр. ин-т, 1959. 140 л.

163. Намитоков К.К., Волосов В.Е., Пархоменко С.В. Расчет и исследование полей рассеяния на ЭЦВМ. - В кн.: Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения. 1973, вып. 6(25), с. 19-24.

164. Нерсесян В.Б. Исследование методов и устройств ИИС по преобразованию малых перемещений в заданную функциональную зависимость. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбыш. политех. ин-т, 1974, 159 л.

165. Нечаевский М.Л. Использование распределенных магнитных цепей для построения унифицированных элементов информационно-измерительных систем. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский политехн. ин-т, 1975, 142 л.

166. Никитин В.Г. Исследование дифференциально-трансформаторных преобразователей перемещения с коррекцией выходной характеристики как элементов информационно-измерительных систем. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбыш. политех. ин-т, 1973, 185 л.

167. Никонов А.И. Исследование индуктивных преобразователей перемещений с ферромагнитными кодовыми дорожками. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Уфа, Уфимск. авиац. ин-т, 1977, 194 л.

168. Новицкий П.В. Методы расчета комплексного магнитного сопротивления стали при различной степени проявления поверхностного эффекта. - Труды ин-та физики металлов. Вып. 15, АН СССР, Уральский филиал. М., 1954.

169. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968, 248с.

170. Новицкий П.В. Теоретическое и экспериментальное исследование цепей электромеханических приборов с индуктивными приемными преобразователями. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Л., Ленингр. политехн. ин-т, 1953, 191 л.

171. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л., Энергия, 1970, 358 с.

172. Осипов В.Н., Лиманов И.А. Исследование динамического режима работы индуктивного преобразователя перемещений. - В кн.: Автоматические измерительные и регулирующие устройства. Куйбышевский авиац. институт, 1974, Том 7, с. 23-26.

173. Ошурков П.Г. О распределении магнитных свойств вдоль ферромагнитного цилиндра. - Труды ин-та физики АН Латв. ССР, 1954, вып. 7, с. 69-77.

174. Панамски И.М., Ушев Г.П., Лефтеров С.С. Функция на преобразование на индукционен преобразовател с назъбен магнитопровод. - Известия на ВМЕИ «Ленин», Извъиредно Издание, 1976, Книга X, с. 81-90.

175. Пашенцев Н.Н. Разработка и исследование контурных индуктивных преобразователей как элементов информационно-измерительных систем Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышев. политехн. ин-т, 1978, 236 л.

176. Передельский Г.И. Вопросы импульсного питания индукционного датчика. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Томск, Томск. ин-т радиоэлектроники и электрон. техн., 1968, 155 л.

177. Петрушенко Е.И. К расчету перемагничивания ферромагнетиков сложной формы в квазистатическом приближении. - В кн.: Математическое моделирование и теория электрических цепей, 9. К., Наукова думка, 1971.

178. Петрушенко Е.И. Метод расчета электромагнитного поля в полном ферромагнитном цилиндре с учетом гистерезиса. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1972, №7.

179. Платонов Г.Б. Графо-аналитический расчет двухтактных индуктивных датчиков перемещений с выходом на переменном токе. - Изд. высш. учебн. заведений, Электромеханика, 1973, № 11, с. 1232-1238.

180. Покровский А.Д., Хвалебнов Ю.П. Анализ сигналов высших гармоник измерительных преобразователей. - Дефектоскопия, 1077, №2, с. 83-88.

181. Попов И.Ф. Исследование и разработка магнито-трубчатых преобразователей перемещения. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Моск. горн. Ин-т, 1975, 162 л.

182. Попова В.П., Федотов Л.Н. Зависимость электросопротивления железоникелевых сплавов от магнитного поля и механических напряжений. - В кн.: Прецизионные сплавы. Металлургиздат, М., 1962, вып. 25, с. 41-52.

183. Поцелуев Ю.П. Разработка и исследование компенсационных преобразователей низкочастотных линейных ускорений для информационно-измерительных систем. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышев. политехн. ин-т, 1977, 156 л.

184. Преображенский А.А. Теория магнитизма, магнитные материалы и элементы. М.: Высш. школа, 1975.

185. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под. ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.

186. Пузанков В.В. Коррекция влияния изменений зазора на погрешность индуктивных преобразователей. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, № 10.

187. Пузанков В.В., Прянишников В.А. Параметрический способ снижения погрешности индуктивных преобразователей. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, № 9.

188. Пузанков В.В., Прянишников В.А. Погрешности индуктивных накладных преобразователей толщины покрытия. - Изд. высш. учебн. заведений, Приборостроение, Том XXI, 1978, № 7, с. 21-26.

189. Пульер Ю.М. Индукционные электромеханические элементы вычислительных дистанционно следящих систем. М.: Машиностроение, 1964. - 294 с.

190. Пульер Ю.М., Колесов Ю.А., Асиновский Э.Н. Индукционные электромеханические функциональные преобразователи. М., Энергия, 1969, 110 с.

191. Пятин Ю.М. Расчет электрических элементов измерительных приборов. М., Машиностроение, 1965, 199 с.

192. Рашкович М.П., Рашкович П.М., Шкловский Б.И. Индуктивные преобразователи для автоматизации металлорежущих станков. М., Машиностроение, 1969, 151 с.

193. Результаты расчетов электромагнитных полей в ферромагнитных цилиндрах с учетом гистерезиса. Е.М. Иванов, Е.И. Петрушенко, М.В. Пийтер, В.Е. Глухова. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1974, № 1.

194. Розенблат М.А. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. - ЖТФ, т. XXIУ, 1954, № 4, с. 637-661.

195. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М., Наука, 1974, 768 с.

196. Розентул С.А. Электрические приборы для контроля размеров. М., НИИМаш, серия с-II, 1968, 52 с.

197. Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы. М., Госэнергоиздат, 1949, 523 с.

198. Русин Ю.С. К вопросу расчета индуктивных датчиков.- Приборостроение, 1962, № 10.

199. Русин Ю.С. Потери в магнитопроводе электромагнитных элементов, вызванные полем рассеивания. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1975, № 11.

200. Русин Ю.С. Разработка комплекса инженерных методов расчета электромагнитных систем. Диссертация на соиск. ученой степ. докт. техн. наук. М., Московский энергет. ин-т, 1969, I кн. 333 л., II кн. 110 л.

201. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. Л., Энергия, 1968, 132 с.

202. Рыбиков Н.Н. Разработка и исследование устройства для автоматического контроля формы прокатных волков. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Омск, Омск. политехн. ин-т, 1972, 194 л.

203. Савич А.И. Разработка и исследование индуктивных автокомпенсационных устройств следящего типа для линейных измерений. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Омск, Омск. политех. ин-т, 1974, 258 л.

204. Савченко М.Г., Филипов В.И., Марьянов Г.М. Индукционный датчик линейного перемещения с выходом на постоянном токе. - В сб.: Проектирование устройств электропитания и электропривода. Т. 2, М., Энергия, 1973, с. 121-128.

205. Сандовский В.А., Барабашкин В.М. Приближенный расчет импеданса, вносимого немагнитной пластиной в накладной преобразователь. - Дефектоскопия, 1977, № 1, с. 20-25.

206. Сапожников А.Б., Нарута Г.К. К теории магнитной толщинометрии и смежной с ней задачи. В кн.: Доклады XX научно-технической конференции по радиоэлектронике. Томск, Томский университет, 1974, с. 10-16.

207. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. М., Энергия, 1971, 560 с.

208. Сахаров Ю.И. Исследование частотно-аналогового индуктивного преобразователя перемещений. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Куйбышев, Куйбышевский политехн. ин-т, 1969. 165 л.

209. Саяпина Е.Г. Датчики перемещений с подмагничиванием от постоянных магнитов. - Труды ВНИИ электромеханики, т. 32, 1970, с. 221-235.

210. Саяпина Е.Г. Разработка и исследование индуктивных датчиков и датчиков с подмагничиванием от постоянных магнитов. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Московский энерг. ин-т, 1969. 343 л.

211. Семерджиев А.Х. Исследование индуктивных соленоидных датчиков для автоматического контроля размеров при сопряженной обработке. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Мосстанкин, 1974, 145 л.

212. Сергеев В.И. Методика определения основных параметров дифференциальных индуктивных частотных преобразователей силоизмерительной аппаратуры опытовых бассейнов. - НТО «Судпром», Экспериментальная гидротехника судов. Вып. 128, Судостроение, 1969.

213. Сергеев В.И., Сызранцев В.М. Определение характеристик магнитных систем индуктивных преобразователей, предназначенных для работы в аппаратуре опытовых бассейнов. - НТО «Судпром», Экспериментальная гидротехника судов. Вып. 118, Судостроение, 1968.

214. Серединин В.И. Термокомпенсированный дифференциально-трансформаторный преобразователь перемещений. - Измерительная техника, 1973, №4, с. 24-25.

215. Скрипка В.Л. Взаимосвязь характеристик контрольно-измерительных приборов и первичных преобразователей. - Измерительная техника, 1976, № 9, с. 40-42.

216. Слабкий Л.И. Спектр шума Баркгаузена в магнитометрических феррозондовых преобразователях. - Измерительная техника, 1975, № 7, с. 30.

217. Соломенцев Ю.М. Перспективы развития управления технологическими процессами. - Вестник машиностроения, 1980, № 10, с. 43-46.

218. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств. М. - Л., Энергия, 1965, 576 с.

219. Сотсков Б.С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. Госэнергоиздат, 1950, 660 с.

220. Сочнев А.Я. Применение метода непосредственного определения напряженности к расчетам плоскопараллельных полей. - Журнал технической физики, 1967, т. 37, вып. 3.

221. Сочнева Е.Г. Аналитическое определение коэффициента размагничивания и напряженности поля на оси коротких тонкостенных кольцевых магнитов. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1973, том 16, №12, с. 21-26.

222. Срибнер Л.А. Суммирующие схемы с индуктивными преобразователями. - Измерительная техника, 1976, №1, с. 32-34.

223. Срибнер Л.А. Точность индуктивных преобразователей перемещений. М., Машиностроение, 1975, 104 с.

224. Стратийчук В.Т. Исследование индуктивного измерительного преобразователя. - В кн.: Приборы и методы автоматизации экспериментальных исследований, 1974, с. 137-141.

225. Ступель Ф.А. Индуктивные и индукционные преобразователи механических величин. Харьков, Изд. Харьковск. ун-та, 1958, 103 с.

226. Ступель Ф.А. Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин. М.-Л., Энергия, 1965, 116 с.

227. Сулейманов Н.Т., Малкова Г.Н., Богданова Н.А. К расчету параметрической надежности измерительных преобразователей с постоянными магнитами. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1977, Том 20, № 1, с. 117-121.

228. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. М. - Л., Энергия, 1966, 690 с.

229. Ураксеев М.А. Анализ магнитной цепи индуктивных преобразователей перемещений с П - образным магнитопроводом. - Известия ВУЗов, Приборостроение, 1977, Том 20, № 8, с. 37-41.

230. Ураксеев М.А. К расчету многооборотных мостовых преобразователей угла поворота. - Изд. высш. учебн. заведений, Электромеханика, 1977, № 3, с. 338-343.

231. Ураксеев М.А. Магнитомодуляционный функциональный преобразователь перемещений. - Приборы и системы управления, 1974, №1, с. 49-50.

232. Ураксеев М.А. Разработка и исследование бесконтактных электромеханических элементов счетно-решающих устройств. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Ташкент, Ташкентск. политехн. ин-т, 1970, 148 л.

233. Ураксеев М.А., Ильясов Р.М. Автокомпенсационное устройство измерения линейных перемещений. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1974, №12, с. 1379-1380.

234. Ураксеев М.А., Праздников Н.И., Минигалиева З.Ш. Мостовой индуктивный преобразователь. - Измерительная техника, 1977, № 3, с. 82-84.

235. Утяшев Р.И. Исследование и разработка делительных преобразователей перемещений с распределенными магнитными параметрами. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Уфа, Уфимский авиац. ин-т, 1978, 288 л.

236. Ушаков И.А. Намагничивание тел конечной длины. - Минвуз РСФСР, Рязанский радиотехн. ин-т, Рязань, 1978, 79 с.

237. Ушаков И.А. О намагничивании образцов конечной длины. - Труды НИИ метрологии высших учебных заведений. М. Издательство стандартов, 1973, т. 9, с. 172-176.

238. Фастрицкий В.С., Фишкин П.Ш. Электрическое моделирование поля накладного датчика, расположенного над двухслойным образцом. - В сб,: Методы и приборы автоматического контроля, Рига, РПИ, 1976, вып. 6.

239. Фастрицкий В.С., Фишкин П.Ш., Клейнберг А.Я. Некоторые вопросы автоматизации проектирования вихретоковых приборов. - В кн.: Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. Минвуз, Латв. ССР, Рига, Выпуск 1, 1977, с. 42-48.

240. Фастрицкий В.С., Фишкин П.Ш., Тарасов В.Г. К вопросу о точности электрического моделирования поля накладного датчика над двухслойной средой. - В сб.: Методы и приборы автоматического контроля, Рига, РПИ, 1971, вып. 7.

241. Фастрицкий В.С., Фишкин П.Ш., Фурлендер Е.М. Расчет параметров RC-сеток для моделирования поля накладного преобразователя с заданной точностью. - В кн.: Методы и приборы автоматического контроля. Рижский политех. ин-т, Рига, 1973, вып. 9, с. 3-12.

242. Федоров А.В., Партола Е.И. Влияние метода нагружения на выходные характеристики магнитоанизотропных трансформаторных преобразователей. - Вестник харьковского политехн. ин-та, 1977, вып. 128, с. 70-74.

243. Федотов А.В. Применение индуктивных измерительных систем для бесконтактного контроля размерных параметров. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Моск. станкоинстр. ин-т, 1965, 244 л.

244. Федотов А.В. Увеличение диапазона линейного преобразования индуктивных измерительных преобразователей. - Измерительная техника, 1971, № 9. - С. 16 - 18.

245. Федотов А.В., Рыбиков Н.Н., Моисеев В.А. Анализ индуктивного измерительного преобразователя соленоидного типа. - В кн.: Автоматизация контроля в машиностроении. Омск: Омский политехн. ин-т, 1973. - С. 109 - 116.

246. Федотов А.В. Расчет температурной погрешности индуктивного преобразователя на стадии проектирования. В кн.: Автоматическое производство и контроль в машиностроении. Омск: Омский политехн. ин-т, 1974. - С. 44 - 58.

247. Федотов А.В. Расчет индуктивных измерительных преобразователей. Новосибирск, НИСИ, 1978, 82 с.

248. Федотов А.В. Расчет и проектирование индуктивных измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1979. - 173 с.

249. Федотов А.В. Расчет и проектирование индуктивных датчиков перемещений. Омск: Изд-во ОмПИ, 1980. - 86 с.

250. Федотов А.В., Моисеев В.С. Метрологический расчет соленоидного преобразователя перемещений. - Измерительная техника, 1976, №12, с. 21-22.

251. Федотов А.В., Савич А.И. Метрологические возможности индуктивных приборов для линейных измерений. - В кн.: Устройства автоматизации и механизации технического контроля качества. Омск, Омский политехнический ин-т, 1974, с. 18-34.

252. Фикс-Марголина И.Г. Разработка и исследование информационно- измерительных преобразователей с распределенными параметрами с учетом нелинейных магнитных характеристик стали. Диссерт. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Ташкентский политехн. ин-т, Ташкент, 1975.

253. Фрейдлин Ю.М., Макаренко Г.Д. Способ уменьшения температурной погрешности индуктивного приемника. - Измерительная техника, 1970, №8, с. 43-44.

254. Характеристики ферромагнитных материалов для моделирования на ЦВМ электромагнитных полей. И.Л. Бондарь, В.С. Кучинская, Б.А. Маршаленко, Е.И. Петрушенко, Г.П. Пийтер, Н.Е. Февралева. - В кн.: Проблемы технической электродинамики, Республиканский сборник. 1974, вып. 49, с. 83-86.

255. Хвалов Ю.Г., Блох О.И. Измерение весьма малых перемещений при помощи индуктивных преобразователей. - Известия ВУЗов, Приборостроение. 1966, т. 9, № 1, с. 41-46.

256. Хвалов Ю.Г., Юзепольский А.И. Расчет индуктивного преобразователя малых перемещений. - Приборы и системы управления, 1970, № 8, с. 22-24.

257. Цикерман Л.Я., Котляр Р.Ю. Индуктивные преобразователи для автоматизации контроля перемещений. М., Машиностроение, 1966, 112 с.

258. Чаман В.С. Исследование и создание индуктивного самописца на базе самобалансирующегося моста. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, М., Мосстанкин, 1957, 157 л.

259. Чернавкин Л.Д. Линеаризация сигнала одинарного индуктивного датчика. - Приборы и системы управления, 1974, № 4, с. 30, 35-36.

260. Чернавкин Л.Д. Одинарный индуктивный датчик для линейных измерений. - В кн.: Труды института Всесоюзн. научн.-исслед., констр.-технологич. ин-т подшипниковой пром-ти. 1978, № 2, с. 44-45.

261. Черных В.В. Разработка и исследование первичных индуктивных преобразователей частотных датчиков перемещения. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Уфа, Уфимский авиац. ин-т, 1976, 216 л.

262. Чижиков В.Ю., Измайлов Е.А., Смуров Ю.В. Анализ влияния геометрических параметров катушек и их расположения на выходные параметры индуктивных датчиков угла. - Известия ВУЗов, Электромеханика. 1974, №10, с. 1136-1141.

263. Шахтарина Г.С. Реактивный момент в датчиках угла. - В кн.: Электромашинные элементы автоматики. Межвузовский сборник, Ленинградский электротехн. ин-т, Л., 1977, № 116, с. 117-125.

264. Шульц Е.Ф., Речкалов И.Т., Фрейдлин Ю.М. Индуктивные приборы контроля размеров в машиностроении. М., Машиностроение, 1974, 144 с.

265. Электрические измерения неэлектрических величин/ Под ред. П.В. Новицкого. Л.: Энергия, 1975. - 576 с.

266. Янус Р.И. Некоторые вопросы теории и техники магнитных измерений. Диссертация на соиск. ученой степени докт. физико-математ. наук. Свердловск, Уральский филиал АН СССР, 1959.

267. Янус Р.И. О коэффициентах размагничивания ферромагнитных стержней. - Сборник, посвященный 70-летию академика Иоффе А.Ф., АН СССР, М., 1950.

268. Ясинскас И.И. Исследование эффективности диффе-ренциального трансформаторного преобразователя. Диссерт. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Каунасс, Каунасский политехн. ин-т, 1959, 133 л.

269. Automatisierte Langenmeβtechnik. - "Konstr. Elem. Meth.", 1980, 17, № 9, s. 55-56, 58.

270. Bartel W. Ein induktiver Wegaufnehmer mit geringem Aufwand. - Arch. Techn. Mess., 1971, № 428, k. 106-107.

271. Beckers J.H. Elektrisches Messen mechanischer Groβen. - "VDJ-Z"", 118, № 17-18, 1976, s. 863-872.

272. Bill E. Probleme moderner Feinmeβtechnik. - "Letz. - Mitt. Wiss. und Technik", 6, № 7, 1976, s. 277-282.

273. Capteurs de deplacement JFELEC. - Jfelec. Montreuilsous - Bis, s. a, 2p, i 11.

274. Capteurs inductifs sensline. - Promofluid, 1975, №34, s. 32.

275. Frank H. Jnduktive Messung kleiner und grosser Weganderungen. - Haus Techn., Vortragsveroff, 1972, № 301, s. 21-27.

276. Gutsch R. Fehlerangabe bei electronischen Feinzeigern. - Feingeratetechnik, 26, Jg. №6, 1977, s. 247-250.

277. Herold H. Uber die Genauigkeit und die Empfindlichkeit von Messenverfahren mit induktiven Wegaufnehmern. - Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule fur Maschinenbau. Karl-Marx-Stadt, 1962, № 3.

278. Holbein G. Jnduktive Meβgroβenaufnehmer in Bruckenshaltung. - "Elek.-Anz.", 1973, 26, №20, s. 412-414.

279. Hollingum Jack. Quality cheaper with computeraided control. - Engineer (Gr. Brit), 1975, 240, № 6207. **.**

280. Jnduktive Wegaufnahme mit Linearisierung. - Feinwerktechn. + Messtechn., 1975, 83, №7, s. 321.

281. Kautsch R. Jnduktive Meβgroβenumformung. Teil I, - «Archiv fur technisches Messen und industrielle Meβtechnik» (ATM), 1970, 418, № 11, s. 255-260.

282. Kautsch R. Jnduktive Meβgroβenumformung. Teil II, - «Archiv fur technisches Messen und industrielle Meβtechnik» (ATM), 1970, 419, № 12.

283. Kondaschewski W.W., Fedotow A.W., Sawitsch A.J. Beurteilung der meβtechnischen Anwendungsmoglichkeiten induktiver Langenmeβgerate. - Feingeratetechnik, 23, 1974, № 2, s. 61-64.

284. Lacy Karl. Electronics domiate inspection trends. - Metalwork. Prod., 1973, 117, № 5, s. 102-105.

285. Loos H.R. Wirkungsweise und Berechnung Von Meβwertaufnehmern auf Wirbelstrombasis zur beruhrungsfreien Wegmessung. - Archiv fur Technisches Messen (ATM), 1976, 43, № 10, s. 309-313.

286. Messen mit Elektronik. - Maschinen-welt - Elektrotechn. 28, 1973, № 6, s. 131-132.

287. Pflier Pal M. Elektrische Messung mechanischer Grossen. Vierte Auflag, Berlin, 1956.

288. Piermont Maurice. Zes capteurs de deplacement. - Mach. - outil, 1973, 38, №302, s. 251, 253, 257, 259.

289. Strauch H. Jnductive transducers for dispalcement measurement at fugh temperatures and in severe environmets. - EUROCON'74. Eur. Conf Electrotechn., Amsterdam, 1974, New. Vork, NV. The Hague, 1974, 131-611-13, 1-612.

290. Szparkowski Z. Jndukcyine przyrsadw czujnikowe do pimiarow dlugosci. - Mechanik, 49, № 11-12, 1976, s. 567-570.

291. Wechenmann A. Ein neuer Weggeber zum elektrischen Messen groβer Verschiebungen. Teil II. - Archiv fur technisches Messen (ATM), 1973, v. 452, № 9, s. 161-166.

292. Wegaufnehmer mit Anpaβverstarker. - Jnd.-Anz., 1972, 94, №35, s. 803.

293. Wiemer A., Lehman R. Theoretische untersuchungen uber die induktive Messung kleiner Wege mittels Doppeldrossel. - Feingeratetechnik, 1954, № 7, s. 291-297. **61.**

294. Woschni H.G. Zu den Grundlagen der induktiven Langenmessung mit Tragerfreguenz. - Feingeratetechnik, 1966, T. 15, № 8, s. 358-362. **21.**

295. Horn K., Weingraber H.V. Uberblick uber moderne Verfahren der Jn-Process-Messung in der Fertigungstechnik. "CJPP Ann.", 1977, 26, № 1, s. 257 - 262.

296. Интеллектуальная измерительная система с индуктивной головкой отклонения/Компанейц Д.А., Компанейц А.Н., Федотов А.В. - Динамика систем, механизмов и машин: Матер.VI Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – Кн.2. - С. 220-224.

297. Уточнение аналитического описания градуировочной характеристики индуктивного измерительного преобразователя перемещений / Федотов А.В., Компанейц Д.А. - Омский научный вестник. – 2006. Вып. 2. – С. 154 – 155.

298. Режим доступа: http://www.tesabs.ru

299. Режим доступа: http://www.mahr.com

300. Режим доступа: http://www.marposs.com

301. Режим доступа: http://www.mitutoyo.com

302. Режим доступа: http://www.tesabs.ru/ru/ TESA_General_Catalogue_ 2010_EN.

303. Режим доступа: http://www.cognitens.com

304. Режим доступа: www.hexagonmetrology.com

Оглавление

Введение 3
1. Анализ состояния теории индуктивных измерительных средств 7
1.1. Современное состояние производства индуктивных измерительных преобразователей 7
1.2. Обзор библиографии по теории индуктивных измерительных преобразователей перемещений 10
1.3. Анализ библиографических источников 12
2. Оценка математических моделей индуктивных измерительных преобразователей 17
2.1. Оценка эффективности приложения теории магнитных цепей к описанию метрологических характеристик индуктивного преобразователя 17
2.2. Классификация индуктивных измерительных преобразователей с учетом особенностей их математических моделей 26
2.3. Оценка требований к индуктивному измерительному преобразователю как к элементу автоматизированной информационно-измерительной системы 54
3. Уточнение математической модели индуктивного измерительного преобразователя 69
3.1. Метрологическая характеристика индуктивного преобразователя 69
3.2. Оптимизация конструктивной схемы преобразователя 75
3.3 Магнитная проницаемость разомкнутого сердечника 79
Выводы 83
Библиографический список 84
Оглавление 107

ПРИЛОЖЕНИЕ

Обзор научных работ по исследованию индуктивных измерительных преобразователей

Таблица П1

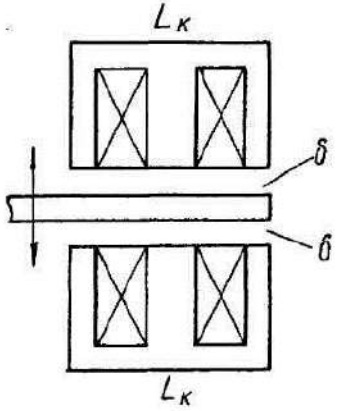
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Мильштейн В.Н. [156] Метод расчета электрических цепей с выражением выходного сигнала через эквивалентные э.д.с.	Дроссель с переменными воздушными зазорами 	Индуктивность $$L_к = \frac{0{,}4\pi \cdot W^2 10^{-8}}{R_ж + \frac{2\delta}{F'}},$$ ***W***- число витков катушки, $R_{ж}$ - магнитное сопротивление сердечника, ***F'*** - площадь сечения зазора. Разность индуктивностей $$\Delta L_к \approx L_к \frac{2\Delta\delta/F'}{R_ж + 2\delta/F'}.$$ Максимальная выходная мощность измерителя $$P_{max} = \left(\frac{2\Delta\delta/F'}{R_ж + 2\delta/F'}\right)^2 \frac{0{,}4\pi \cdot 10^{-8}\omega}{R_ж + 2\delta/F'} \times$$ $$\times \frac{(JW)^2}{\frac{\rho l_{cp}(R_ж + 2\delta/F')}{0{,}4\pi 10^{-8}\omega k Q_{ок}} + \sqrt{1 + \left[\frac{\rho l_{cp}(R_ж + 2\delta/F')}{0{,}4\pi \cdot 10^{-8}\omega k Q_{ок}}\right]^2}}$$ ρ - удельное электрическое сопротивление провода, l_{cp} - средняя длина витка, $Q_{ок}$ - площадь сечения окна магнитопровода, $к$ - коэффициент заполнения обмотки. Электромеханическая сила $$F_{max} = \frac{1}{981}\left[\left(\frac{0{,}4\pi JW}{R_ж + 2(\delta - \Delta\delta_{max})/F'}\right)^2 - \left(\frac{0{,}4\pi JW}{R_ж + 2(\delta + \Delta\delta_{max})/F'}\right)^2\right]\frac{1}{8\pi} \cdot \frac{1}{2F'}$$	Цель расчета - получение наибольшей выходной мощности преобразователя. Ампервитки обмотки преобразователя ограничиваются: 1) из условия допустимого нагрева $$(JW)^2_{max} = \frac{k Q_{ок} S}{\rho l_{cp} \sigma_0}$$ σ_0 - удельная боковая поверхность охлаждения 2) из условия ограничения электромеханической силы $$(JW)^2_{max} = 16 \cdot 981\pi F' F_{max} / \left[\left(\frac{0{,}4\pi}{R_ж + 2(\delta - \Delta\delta_{max})/F'}\right)^2 - \left(\frac{0{,}4\pi}{R_ж + 2(\delta + \Delta\delta_{max})/F'}\right)^2\right]$$	1. При расчете потоки рассеяния не рассматриваются. 2. Нелинейность кривой намагничивания не учитывается. 3. В качестве основного показателя преобразователя принимается его выходная мощность. Другие метрологические характеристики не рассматриваются. 4. Анализ и расчет магнитной цепи дросселя не рассматривается. 5. Для дифференциальной трансформаторной схемы приводится выражение для э.д.с. $$E = E_{верх} - E_{нижн} = 2\omega \frac{0{,}4\pi W_2^2}{R_ж + \frac{2\delta}{F'}} \cdot \frac{1}{W_2} \times \frac{\frac{2\Delta\delta}{F'}}{R_ж + \frac{2\delta}{F'}} \cdot 10^{-8}(J_1 W_1).$$ W_1, W_2 - число витков первичной и вторичной обмоток.

Таблица П1 (продолжение 1)

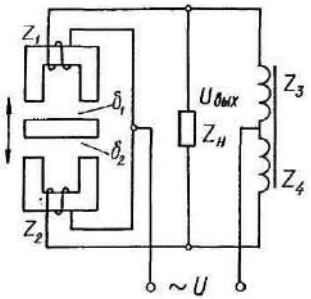
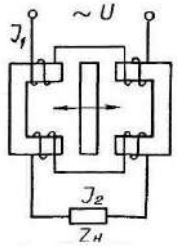
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Дмитриев Е.И. [71] Расчет магнитного поттока в цепи с пренебрежением потоками рассеяния и выпучивания. Анализ последовательной и мостовой схем включения преобразователя	Двойная катушка с общим якорем в мостовой схеме  	I. Характеристика преобразования $U_{вых} = \frac{4U}{\frac{S_0 W_0^2}{S W^2} \cdot \frac{l}{\delta_0} + 2} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$, U - напряжение питания, Wo - число витков каждой из обмоток датчика, $\boldsymbol{\delta_0}$ - начальный воздушный зазор датчика, W - число витков каждой обмотки дифференциального автотрансформатора, l - суммарный воздушный зазор в магнитопроводе дифференциального автотрансформатора, S - поперечное сечение сердечника трансформатора, L_1, S_1 - длина и площадь сечения магнитопровода, $L = \frac{4\pi W^2}{\frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \frac{l_1}{\mu_1 S_1}}$ 2. Чувствительность $(U_{вых})_{max} \approx 2U \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$.	1. Катушка датчика рассчитывается из условия обеспечения допустимой величины нагрева протекающим током и обеспечения допустимой величины электромеханического усилия на подвижный якорь. 2. Допустимые ампервитки катушки находятся из соотношения $(JW)^2_{max} = \frac{16{,}981\pi F S}{\left(\frac{0{,}4\pi}{R_ж + \frac{2\delta - 2\Delta\delta}{S}}\right)^2 - \left(\frac{0{,}4\pi}{R_ж + \frac{2\delta + 2\Delta\delta}{S}}\right)^2}$ F - допустимое усилие на якорь.	1. Основное внимание автор уделяет исследованию схем включения преобразователя. 2. Условие достижения наибольшей чувствительности преобразования записывается в виде $\frac{S_0 W_0^2}{S W^2} \cdot \frac{l}{\delta_0} \to min$ 3. В общем виде рассматриваются ограничения на изменение зазора у трансформаторного преобразователя. 4. Расчет размеров магнитопровода преобразователя не рассматривается.
	Трансформаторня схема  	I. Характеристика преобразования $J_{2эф} = \frac{U\omega\Delta M}{2\sqrt{(\omega^2 L_1 L_2 - R_1 R_2 - \omega^2 \Delta M^2)^2 + \omega^2 (R_2 L_1 + R_1 L_2)^2}}$ L_1 - индуктивности первичных обмоток, L_2 - индуктивности вторичных обмоток, M - взаимная индуктивность обмоток, R_1, R_2 - активные сопротивления первичной и вторичной цепей.		

Таблица П1 (продолжение 2)

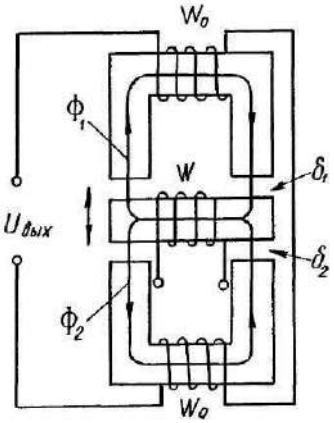
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Куликовский Л.Ф. [134,135] Метод расчета магнитных сопротивлений и проводимостей участков цепи и определение магнитных потоков. Учет полей выпучивания в зазорах.	Дифференциальный трансформаторный датчик 	I. Функция преобразования $U_{вых} = U\frac{W_0}{W}\cdot\frac{s(\delta_2-\delta_1)}{2k\delta_1\delta_2+\delta_0 S}$, s - площадь воздушного зазора, k - эмпирический коэффициент, учитывающий выпучивание в зазоре, $\delta_0 = \delta_1 + \delta_2$ 2. Чувствительность преобразования $S_U = 2U\frac{W_0}{W}\cdot\frac{1}{\delta_0}$. 3. Тяговые усилия на якорь $F_{ср} = \frac{8UU_{вых}}{\omega^2 S^2 W W_0}$, ω - частота питающего тока. 4. Предел измерения $\delta_{1max} = \frac{\delta_0}{2}\left[1 \pm \sqrt{\frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon}\left(1+\frac{2s}{k\delta_0}\right)}\right]$, ε - допустимая относительная нелинейность характеристики. 5. Динамическая погрешность $\gamma = \frac{\Omega}{\omega}\cdot 100\%$, Ω- частота вибраций якоря при их гармоническом характере.	Исходные данные: назначение преобразователя, характер и величина измеряемого перемещения, сопротивление нагрузки, допустимые тяговые усилия, допустимая степень нелинейности. 1. В зависимости от назначения преобразователя ыбирается его тип и конструкция. 2. По характеру измеряемой величины определяют частоту питания. 3. Форма сечения магнитопровода выбирается из условия минимальности средней длины витка катушки. 4. Лучшей формой магнитной цепи является та, которая обеспечивает наибольшую чувствительность к перемещению при минимальных габаритах и минимальных электромагнитных силах с учетом простоты конструкции.	1. Поток рассеяния не учитывается. 2. Магнитные потоки определяются методом приближений. 3. Используется экспериментальная кривая намагничивания, снятая на переменном токе. 4. Выпучивание поля в зазоре оценивается на основе экспериментальных данных. 5. При оценке нелинейности характеристики в качестве аппроксимирующей прямой принимается касательная к характеристике при среднем измерительном зазоре. 6. Исследована динамика процесса измерения методами теории автоматического управления.

Таблица П1 (продолжение 3)

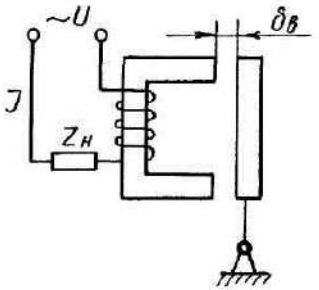
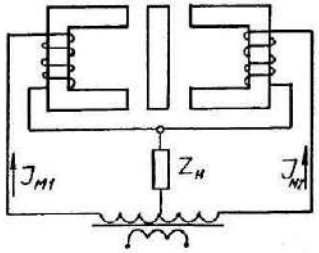
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Сотсков Б.С. [218,219] Метод расчета магнитного потока в цепи через магнитные сопротивления ферромагнитных участков и магнитные проводимости немагнитных зазоров, при использовании кривой намагничивании материала и учете выпучивания поля в немагнитных зазорах методом "вероятных потоков" и методом построения поля.	Датчик с изменяющейся индуктивностью и переменным воздушным зазором 	I. Индуктивность $$L_x=\frac{W^2}{\frac{1}{\mu_0}\left[\frac{l_c}{\mu_c S_c}+\frac{l_{як}}{\mu_{як} S_{як}}\right]+\frac{2\delta_в}{S_в\mu_0}}$$ *W* - число витков катушки; ***lc, lяк*** - средняя длина сердечника и якоря; ***δв, Sв*** - площадь поперечного сечения сердечника и якоря; S***c, Sяк*** - *д*лина и площадь сечения воздушного зазора. 2. Ток в цепи катушки $$\dot{J}=\frac{\dot{U}}{(R_н+R)+j\omega\left(L_н+k\frac{S_в}{\delta_в}\right)}$$ *R* — активное сопротивление катушки. 3. Сила притяжения якоря $$P_э=k_0U^2\left(\frac{1}{G_в^2}\cdot\frac{dG_в}{d\delta_в}\right)=2k_0'\frac{U^2}{S_в},$$ *Gв* - проводимость воздушного зазора.	1. Цель расчета - построение характеристики $L_x = f(\delta_в)$ или ***Lx=f(Sв)***. 2. Основные расчетные соотношения $$\frac{\omega L_x}{\sqrt{(R_н+R)^2+\omega^2(L_н+L_x)^2}}=\frac{\omega B_m S W}{U_m},$$ $$G_в=\frac{2\delta_в}{\mu_0 S_в}=\frac{W^2}{L_x}-\frac{1}{\mu_0}\left[\frac{l_c}{\mu_c S_c}+\frac{l_{як}}{\mu_{як} S_{як}}\right].$$ 3. Порядок расчета: а) задать *Lx* и определить *Bm*; б) по кривой намагничивания материала определить μ; в) рассчитать *Gв*; г) определить изменяющуюся величину ***δв*** или ***Sв***; д) по точкам построить ***Lx=f(δв)*** или ***Lx=f(Sв)***; 4. При расчете катушки датчика указывается на необходимость выполнения двух условий: а) катушка должна обеспечить требуемую м.д.с. при допустимой величине тока, б) нагрев катушки не должен быть выше допустимого.	1. При расчете графическим методом решается система уравнений $$f=H_c+H_в'$$ $$B=f(H)$$ $$B_c=\frac{\Phi}{S_c}=G\frac{l_c}{S_c}H_в'$$ 2. Для расчета используется кривая намагничивания $$B=f(H)$$ 3. Характеристика дифференциального датчика получается суммированием характеристик двух одинарных датчиков. 4. Учитывается распределение магнитного потока вдоль цепи (координата *X*) $$\frac{d^2\Phi_x}{dx^2}-\gamma^2\Phi_x=-2gf,$$ $$\gamma=\sqrt{2R_м g}$$ γ - проводимость рассеяния на единицу длины магнитопровода, *f* - м.д.с. приходящаяся на единицу длины сердечника, *Rм* - магнитное сопротивление единицы длины магнитопровода.
	Дифференциальная схема 	1. Ток в нагрузке $$\Delta J=J_{м1}-J_{м2}$$ $$J_{м1}=\frac{U_m}{\sqrt{R_\Sigma^2+\omega^2\left(L_н+k\frac{S_в}{\delta_0-\delta_в}\right)^2}},$$ $$J_{м2}=\frac{U_m}{\sqrt{R_\Sigma^2+\omega^2\left(L_н+k\frac{S_в}{\delta_0-\delta_в}\right)^2}},$$ $$R_\Sigma=\frac{1}{\mu_0}\left[\frac{l_c}{\mu_c S_c}+\frac{l_{як}}{\mu_{як} S_{як}}\right]$$		

Таблица П1 (продолжение 4)

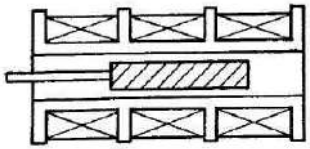
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		2. Угол сдвига фаз между токами *Jм1* и *Jм2* $\varphi = arctg \frac{\omega (L_н + k \frac{\partial \delta}{\partial \delta})}{R_\Sigma} - arctg \frac{\omega (L_н + k \frac{S\delta}{\delta_0 - \delta_\delta})}{R_\Sigma}.$	Выполнение этих требований определяет геометрию катушки и ее намоточные данные.	Данное нелинейное дифференциальное уравнение решается графически. 5. При расчете выпучивание поля в зазоре учитывается либо по эмпирическим формулам и графикам, либо методом построения картины поля в зазоре.
	Датчик с трансформаторной э.д.с. 	1. Ток во вторичной обмотке одинарного датчика $\dot{J}_2 = -\frac{j\omega M \frac{\dot{U}}{Z_I}}{Z_{II} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_I}},$ *M* - взаимная индуктивность обмоток. 2. Тяговые усилия на якорь $P_э = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} [J_1^2 L_1 + 2 J_1 J_2 M + J_2^2 L_2].$ 3. Э.д.с. вторичных обмоток дифференциального датчика $\dot{E}_2 = \frac{Z_н}{Z_{II}} \cdot \frac{j\omega (M_в - M_а) \dot{U}}{\dot{Z}_I + \frac{\omega^2 (M_в - M_а)^2}{\dot{Z}_{II}}}$ 4. Тяговое усилие на якоре $P_э = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} [J_1^2 L_1 + 2 J_1 J_2 (M_а - M_в) + J_2^2 L_2].$		

Таблица П1 (продолжение 5)

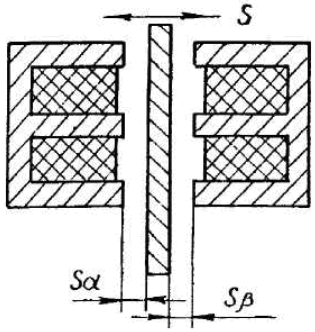
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Wiemer, Lehmann R. [293] Методы расчета электрических цепей, описание магнитной цепи преобразователя без учета кривой намагничивания и распределения потока в зазоре.	Преобразователь перемещений на основе двойного дросселя с переменным зазором  	I. Индуктивности катушек $L_\alpha = \frac{1}{2}\cdot\frac{\omega^2 F\mu_0}{\varkappa S_\lambda + (S_0 \pm S)}$, $L_\beta = \frac{1}{2}\cdot\frac{\omega^2 F\mu_0}{\varkappa S_\lambda - (S_0 \pm S)}$, $\varkappa = \frac{S_\varepsilon}{2\mu_\varepsilon S_\lambda} + 1$, S_E - длина магнитной линии в сердечнике; $S\lambda = S\alpha o = S\beta o$; F - площадь поперечного сечения. 2. Измерительное напряжение в мостовой схеме включения $U_m \approx \frac{1}{2\varkappa} U \frac{S}{S_\lambda} \sqrt{\frac{1+\left(\frac{R_\gamma}{\omega L_\lambda}\right)^2\left(1 \pm \frac{S_0 S}{\varkappa^2 S_\lambda}\right)^2}{\left[1+\left(\frac{R_\gamma}{\omega L_\lambda}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{R_\gamma}{\omega L_\lambda}\right)^2\left(1 \pm \frac{2S_0 S}{\varkappa^2 S_\lambda^2} - \frac{S^2}{\varkappa^2 S_\lambda^2}\right)\right]}}$ $L_\lambda = \frac{1}{2}\cdot\frac{\omega^2 F\mu_0}{\varkappa S_\lambda}$, $R\gamma$ - омическое сопротивление катушки; U - напряжение питания мостовой схемы; S - измеряемое перемещение; So - начальное отклонение якоря от положения, соответствующего балансу моста; η - число витков обмотки; ω - круговая частота питания катушки Если $(R_\gamma/\omega L_\lambda) \ll 1$, то $U_m \approx \frac{1}{2\varkappa} U \cdot \frac{S}{S_\lambda}$, $0 \leq S \leq S_\lambda - S_0$.	Расчет не рассматривается. Приводится ряд рекомендаций по выбору параметров и режима работы преобразователя: 1. Несущая частота питания должна по меньшей мере в 10 раз превосходить наивысшую частоту измеряемого перемещения. 2. Увеличение индуктивного сопротивления преобразователя по сравнению с его активным сопротивлением повышает линейность характеристики и чувствительность преобразователя. 3. Для повышения чувствительности преобразователя следует уменьшать его параметр η_λ для чего следует увеличивать магнитную проницаемость сердечника и увеличивать относительную величину зазора в сердечнике.	1. Указывается, что основными характеристиками преобразователя являются: чувствительность, диапазон измерения и линейность преобразования. 2. Вопросы расчета магнитной цепи преобразователя не рассматриваются. 3. Нелинейность кривой намагничивания и распределение потока в немагнитном зазоре не рассматриваются.

Таблица П1 (продолжение 6)

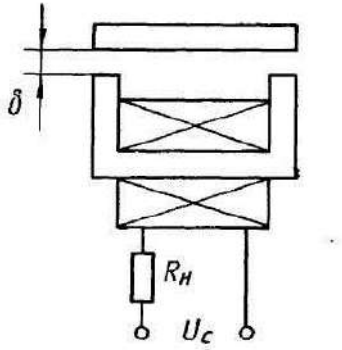
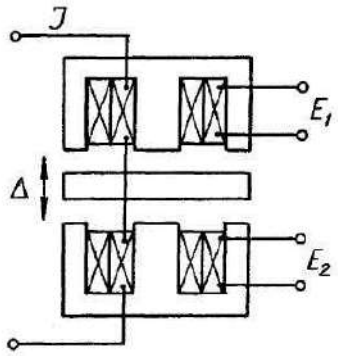
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Ступель Ф.А. [225, 226] Метод расчета электрических цепей с учетом характеристик дросселя по простейшим зависимостям без расчета магнитной цепи.	Одинарный индуктивный датчик 	I. Ток в цепи катушки $J = \frac{U_c}{(R_н + R_к) + j\omega L}$, $R_н$, $R_к$ - сопротивления нагрузки и катушки. 2. Индуктивность катушки $L = \frac{W^2}{R_\mu} \approx W^2 \mu_0 \frac{S}{2\delta}$, $R\mu$ - магнитное сопротивление для магнитного потока.	1. Цель расчета - определение выходной э.д.с. 2. Конкретной методики расчета не приводится. 3. Дается ряд рекомендаций по выбору напряжения и частоты питания, а также материала магнитопровода. 4. При расчете предлагается использовать схемы замещения магнитной цепи. 5. Непосредственно расчет магнитной цепи преобразователя не рассматривается.	1. Магнитную проводимость зазоров предлагается учитывать по формуле $G = \mu_0 \frac{S}{\delta}$, или путем разбивки магнитного потока в зазоре на простейшие геометрические фигуры (метод вероятных путей потока). 2. Расчеты метрологических характеристик преобразователя, а также его конструктивный расчет не рассматриваются. 3. Магнитный поток в цепи не определяется. 4. Кривая намагничивания не учитывается.
	Дифференциально-трансформаторнний датчик 	I. Выходная э.д.с. $\Delta E = E_1 - E_2 = \sqrt{2}\,\omega W_1 W_2 k \Delta$ k - коэффициент преобразования. 2. Чувствительность $k_g = \frac{E}{\Delta}$ 3. Сила притяжения якоря $Q = k \frac{\Phi^2}{S}$, Φ - магнитный поток. 4. Предел перемещения якоря $k = \frac{\Delta_м}{\delta_0} = 0{,}25 \div 0{,}35$, δ_0 - начальный зазор. 5. Динамическая погрешность $\gamma = \sqrt{1 + (\Omega/\omega)^2} - 1$ Ω - угловая частота перемещения.		

Таблица П1 (продолжение 7)

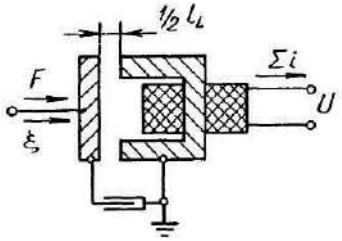
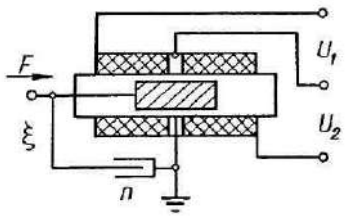
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Harry Herold [227] Метод расчета электрических цепей на переменном токе. Параметры магнитной цепи преобразователя не учитываются. Теория преобразователя рассматривается применительно к измерению вибраций.	Датчик перемещения с изменяющейся индуктивностью  	I. Индуктивность датчика $L = L_0 + S\xi$, ξ - измеряемое перемещение. 2. Чувствительность датчика $S = \frac{\Delta L\ max}{\xi\ max}$ 3. Выходное напряжение U при $J_0 = \hat{J}\cos\omega_h t \quad и \quad \xi = \hat{\xi}\cos(\omega_m t + \varphi)$: $U = (1+k)S'J_0 v - L\Sigma\omega i_\omega + E - \omega_h L \hat{J}_0 \sin\omega_h t$ $k = \frac{\omega_h}{\omega_m} tan\,\omega_h \cdot t \cdot Cot(\omega_m t + \varphi)$ 4. Усилие перемещения якоря $F = (n + s^2 J_0^2 \omega_m C_L)v + SJ_0 \Sigma i_\omega -$ $-\frac{1}{2} S \hat{J}_0^2 \cos^2\omega_h t$, $C_L = \frac{Cot(\omega_m t + \varphi)}{\omega_m^2 L_0}$, $v = \frac{d\xi}{dt}$.	Расчет измерительного преобразователя не рассматривается.	1. К важнейшим характеристикам преобразователя относятся: зависимость перемещение–напряжение, усилие на сердечник и граничная чувствительность. 2. Погрешность преобразователя, вызванная наличием напряжения шумов $\left\lvert \frac{\xi_k}{\xi_{max}} \right\rvert =$ $= \left\lvert \frac{U_k}{\frac{\omega_h \Delta L\ max}{(R_a + R_L)^2} E} \right\rvert .$ Величина $\xi_k \approx 0{,}7 \cdot 10^{-7}$ мм. 3. Переходный процесс в цепи преобразователя при скачкообразном перемещении якоря $J(t) = J_m[\sin(\omega_h t + \varphi) - \frac{\Delta L}{L + \Delta L} l^{-t/\tau} \sin\varphi],$ $\tau = \frac{L + \Delta L}{R_L + R_a}$
	Датчик перемещений с дифференциальной дроссельной системой  	I. Выходное напряжение $U_1 = L_{10}\omega_h \hat{J}\sin\omega_h t - \frac{1}{2}(\omega_h + \omega_m)S \times$ $\times \hat{J}\hat{\xi}\sin[(\omega_h + \omega_m)t + \varphi] - \frac{1}{2}(\omega_h - \omega_m) \times$ $\times S\hat{J}\hat{\xi}\sin[(\omega_h - \omega_m)t + \varphi]$, $U_2 = L_{20}\omega_h \hat{J}\sin\omega_h t + \frac{1}{2}(\omega_h + \omega_m) \times$ $\times S\hat{J}\hat{\xi}\sin[(\omega_h + \omega_m)t + \varphi] + \frac{1}{2}(\omega_h -$ $-\omega_m)S\hat{J}\hat{\xi}\sin[(\omega_h - \omega_m)t + \varphi]$. 2. $F = 2\frac{S^2 J_0^2 \cos^2\omega_h t}{L_0}\hat{\xi}\cos(\omega_m t + \varphi)$.		

Таблица П1 (продолжение 8)

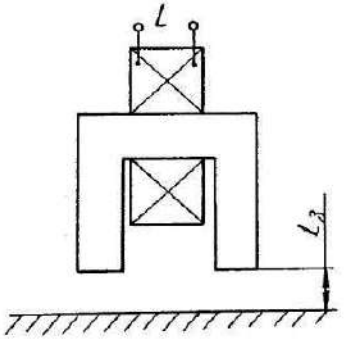
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Федотов А.В. [243] Расчет магнитного потока через магнитные сопротивления и проводимости участков.	Бесконтактный индуктивный датчик 	I. Индуктивность $L = m\rho\mu' \frac{4\pi L_0}{4\pi + N_м(\mu'-1)} + \frac{W^2}{\frac{l}{\mu_c S_c} + \frac{lg}{\mu_g S_g} + \frac{l_з + l_{з0}}{\mu_0 S_з}}$ $m=lk/lc$ - коэффициент, учитывающий длину катушки; ρ - коэффициент, учитывающий положение катушки на сердечнике; $Nм$ - магнитометрический коэффициент размагничивания; μ' - относительная магнитная проницаемость материала сердечника; lc , S_c , μc - длина, площадь сечения и магнитная проницаемость сердечника; $lд$, $Sд$, $\mu д$ - длина и площадь магнитного потока в детали и ее магнитная проницаемость. 2. Добротность датчика $Q = \frac{\sqrt{\omega} L_\infty}{\frac{l_n}{\pi d_n}\sqrt{\frac{\mu_0}{2\gamma_n}} + 0{,}7W^2 \frac{U_c}{l_c}\sqrt{\frac{2\mu_{ec}}{\gamma_c}}}$ ω- круговая частота питающего тока; ln, dn, γn - длина, диаметр и удельная проводимость провода катушки; U_c, l_c, μe_c, γ_c - периметр, средняя длина, магнитная проницаемость на поверхности и удельная электропроводность сердечника. 3. Чувствительность датчика $S = \frac{\partial Z}{\partial l_з}$, где $Z = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L^2}$.	1. Составляется эскиз сердечника датчика и определяются его геометрические размеры. 2. Рассчитывается величина индуктивности датчика $L_{беск}$ при $l_з = \infty$ через коэффициент размагничивания сердечника. 3. Рассчитывается число витков катушки из условия обеспечения максимальной магнитной проницаемости сердечника. 4. Определяется выражение функции преобразования датчика. 5. Определяется выражение для чувствительности датчика. 6. Определяются пределы измерения $\delta l_з = (1+\beta)(1-\sqrt{\frac{1-\delta S_m}{1+\delta S_m}})$ 7. Определяется толщина пластин сердечника датчика.	1. При определении функции преобразования датчика учтен фактор размагничивания разомкнутого сердечника. 2. Учтена погрешность от нестабильности электромагнитных свойств детали при бесконтактном измерении ее размера. 3. Учтено соотношение размеров катушки и сердечника и положение катушки на сердечнике. 4. Пределы измерения определены исходя из допустимой нелинейности характеристики датчика. 5. Учтены потери сердечника датчика путем определения его добротности.

Таблица П1 (продолжение 9)

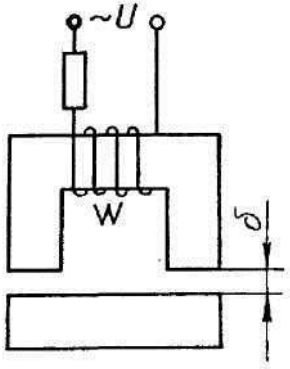
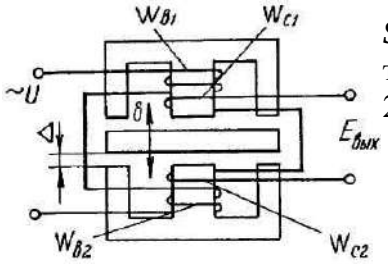
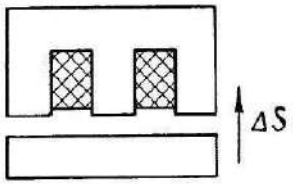
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Цикерман Л.Я., Котляр Р.Ю. [257] Метод расчета магнитного сопротивления магнитной цепи без учета потоков рассеяния и выпучивания потоков в зазорах.	Одинарный дроссельный преобразователь 	I. Индуктивность преобразователя $L=\frac{W^2}{R_{cm}+\frac{2\delta}{\mu_0 S}}$, $R_{cm}=\frac{l_{cm}}{\mu_{cm} S}$ 2. Полное сопротивление преобразователя $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$, *R* - активное сопротивление катушки. 3. Ток в цепи преобразователя $J=\frac{U}{\sqrt{R^2+\omega^2\left[\frac{W^2}{R_{cm}+2\delta(\mu_0 S)^{-1}}\right]^2}}$, *S* - площадь поперечного сечения магнитопровода; l_{Cm}- суммарная длина магнитной силовой линии в стали. 4. Чувствительность: $S_J=\frac{dJ}{d\delta}=\frac{2U}{\mu_0 \omega W^2 S}$. 5. Сила притяжения якоря $F\approx\frac{U^2}{\mu_0 \omega^2 W^2 S}$.	1. Приводятся общие указания по расчету преобразователя без рассмотрения конкретных методик. 2. Указывается, что порядок расчета зависит от назначения и типа преобразователя, измерительной схемы, применяемого измерительного прибора, от заданных условий и исходных параметров. В качестве исходных данных для расчета называются: эскиз преобразователя, максимальное напряжение на выходе, сопротивление нагрузки, выходная мощность, максимальное перемещение, величина суммарного зазора, допустимое тяговое усилие, погрешность, чувствительность, степень нелинейности, максимальная индукция, режим работы, допустимая плотность тока, отношение частот перемещения якоря и питания, коэффициенты заполнения.	1. Магнитные сопротивления стальных участков и проводимости зазоров учитываются по упрощенным зависимостям. 2. При работе преобразователя на переменном токе для определения магнитного сопротивления участков магнитопровода рекомендуется использовать формулу Л.Р. Неймана $Z_{mi}=(0{,}45+j0{,}74)\times\frac{l_i}{U_i}\sqrt{\frac{\omega}{\mu_i \rho_{cm}\mu_0}}$ *li, Ui* - длина и периметр сечения рассматриваемого участка, μi , *Qcm* - магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление материала

Таблица П1 (продолжение 10)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
	Дифференциальный трансформаторный преобразователь 	I. Индуктивности обмоток: $L_1 \approx W_1^2 \frac{\mu_0 S_ц}{2(\Delta-\delta)}$, $L_2 = W_2^2 \frac{\mu_0 S_ц}{2(\Delta+\delta)}$, ***Su,***- площадь поперечного сечения центрального стержня. 2. Выходное напряжение: $E_{вых} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\theta} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{W_c}{W_\delta} U \cdot \frac{\delta}{\Delta}$.		магнитопровода. 3. Расчет магнитной цепи и метрологических характеристик преобразователя не рассматривается.
Woschni H.G. [294] Методы расчета электрических цепей без исследования магнитной цепи преобразователя.	Индуктивный датчик в виде простого дросселя с поперечным подвижным якорем 	1. Индуктивность катушки $L = \frac{W^2}{R_{mc} + R_{mv}}$, *Rmc* - постоянное магнитное сопротивление стали, постоянного зазора и т.д.; *Rmv* - изменяющееся магнитное сопротивление (изменяющийся воздушный зазор). 2. Полное сопротивление преобразователя: $Z = R + j\omega \frac{W^2}{\frac{l_0 + \Delta S}{\mu_0 F_i}}$, *R* - омическое сопротивление катушки, *Fi* - площадь сечения магнитной цепи, Δ*S* -измеряемое перемещение.	Методика расчета преобразователя не рассматривается. Приводятся общие рекомендации по выбору параметров преобразователя: 1. Для уменьшения погрешности от нелинейности ограничивать рабочий участок характеристики, выбирая его вблизи нулевой точки. 2. Выбирать такой режим питания обмотки преобразователя, чтобы нелинейность кривой намагничивания сказывалась бы наименьшим	1. Вопросы расчета магнитной цепи не рассматриваются. 2. Метрологические характеристики не исследуются. 3. Названы следующие составляющие погрешности датчика: нелинейность аарактеристики вследствие принципа действия, нелинейность вследствие нелинейности кривой намагничи-

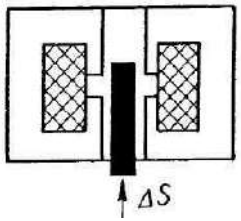
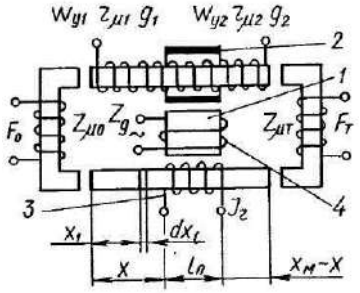
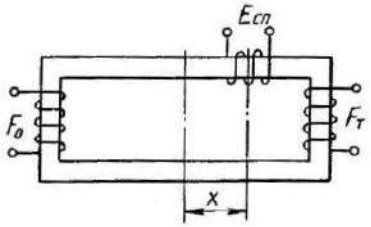
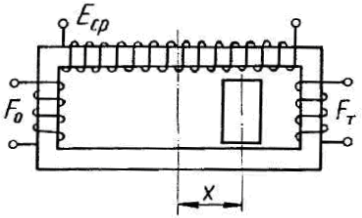
	Индуктивный датчик в виде простого дросселя с проходным подвижным якорем.  	Полное сопротивление обмотки датчика: $$Z = R + j\omega \frac{W^2}{\frac{l}{\mu_0}\left(\frac{1}{F_0} + \frac{1}{F_c + \Delta F}\right)},$$ F - площадь сечения магнитного потока, ΔF - изменение площади сечения магнитного потока при перемещении якоря, l -длина магнитной силовой линии.	образом. 3. Для устранения влияния высших гармоник измерительного напряжения включать в измерительную цепь фильтры. 4. Для уменьшения разброса параметров датчика ужесточать допуски на его размеры и повышать точность направляющих якоря.	вания, остаточное напряжение вследствии разной формы гистерезисных кривых материала, высшие гармонические составляющие измерительного напряжения, погрешности из-за механических допусков, погрешность вследствие эффекта Баркхауза.

Таблица П1 (продолжение 11)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Зарипов М.Ф. [79,80] Метод расчета магнитной цепи через сопротивления и проводимости ее участков. Учет распределенного вдоль цепи магнитного сопротивления, магнитного потока и электрических параметров приводит к описанию цепи неоднородно-неоднородными дифференциальными уравнениями второго порядка с переменными коэффициентами. Для	Обобщенная схема преобразователя с распределенными параметрами  	Для обобщенной схемы выражения метрологических характеристик в окончательном виде не приведены. Обозначения на схеме: 1 - ферромагнитный подвижный сердечник, 2 - подвижный экран, 3 - продольная обмотка, 4 - поперечная обмотка.	Основным уравнением при расчете является статическая характеристика преобразователя. На основе выражения характеристики предлагается находить конкретные уравнения для используемых критериев оптимизации и решать их. Сами уравнения не приводятся.	1. Продольные размеры сосредоточенных обмоток и подвижных элементов не учитываются. 2. Магнитное поле участков с распределенными параметрами принято плоскопараллельным. Исследования из области электромагнитных явлений сведены к задачам теории электрических и магнитных цепей. 3. В работе указывается на невозможность разработки единой и полной методики расчета преобразователей с распределенными параметрами. Предлагаются некоторые общие принципы расчета. 4. Для расчета магнитных проводимостей зазоров рекомендуется строить картину поля в зазоре и использовать метод Б.К. Буля. 5. Потоками выпучивания пренебрега-
	 	I. Статическая характеристика $\dot{E}_{сп} = -j\omega \frac{W_n^2 g J_n}{2\dot{\gamma}(1-\dot{a}^2 e^{-4\dot{\gamma}X_M})} \left(2\dot{a}e^{-2\dot{\gamma}X_M} x \right.$ $\left. x\, ch\dot{\gamma}2X_M + \dot{a}^2 e^{-4\dot{\gamma}X_M} + 1\right)$ $a = \frac{1-Z_\mu \frac{g}{\gamma}}{1+Z_\mu \frac{g}{\gamma}}, \quad \gamma = \sqrt{2g z_\mu},$ *Хм* - максимальное значение координаты подвижной части; *Ёсп* - э.д.с. в подвижной обмотке; g - удельная магнитная проводимость между ферромагнитными стержнями; W_n - число витков подвижной обмотки; **ω** - частота тока	1. Задаются напряжение питания и частота, диапазон контролируемых перемещений *Хм,* допустимая степень нелинейности характеристики **ξ**, чувствительность, характеристики магнитного материала и пр. 2. По заданной нелинейности **ξ** и дополнительным соображениям определяются размеры магнитопровода. 3. Методами расчета магнитных цепей определяется	

учета магнитного поля в зазорах используется метод Б.К.Буля,		возбуждения; γ - коэффициент распространения волны магнитного потока в магнитной линии; *Jn* - ток в подвижной обмотке, $Z\mu$. - модуль магнитного сопротивления; $r\mu$ -удельное значение магнитного сопротивления (ферромагнитного стержня. 2. Степень нелинейности характеристики $\xi\% = 50\left[\frac{sh\,(a\,rch\,\frac{sh\beta}{\beta})}{sh\beta} - \frac{X}{X_M}\right]$ $\beta = \gamma X_M$.	индукция и рассчитываются обмотки возбуждения. 4. Определяются параметры подвижной обмотки и длина магнитопровода.	ется. 6. При расчете используются ряд величин, полученных экспериментально для определенной конфигурации преобразователя. 7. Указывается, что рекомендуется строить статическую характеристику на ЭВМ.

Таблица П1 (продолжение 12)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		3. Чувствительность $\dot{S}_{ox} = -j\omega W_n g \dot{J}_c W_c \frac{ch\dot{\beta}x}{ch\dot{\beta} + sh\beta/\dot{\kappa}_T}$ $K_T = \frac{\gamma}{2Z_{\mu T}}$		8. Исследовано влияния ряда технологических погрешностей изготовления преобразователя. Статистическое распределение погрешностей принято нормальным. 9. Выражения для статических характеристик при учете потоков в основании справедливы в случае соблюдения условия *Fo=const, Φ_o=const*, что нарушается при смещении сердечника. 10. Погрешность от нелинейности определяется по зависимости $\gamma_\xi = \frac{A - A_0}{A_M - A_0} - \frac{X}{X_M} - \xi,$ *Ам, Хм*- максимальные значения выходной и входной величин, преобразо-
	Дифференциальный ПРП с подвижным ферромагнитным сердечником и встречно включенными сосредоточенными на основании одинаковыми секциями обмотки возбуждения и продольно расположенными измерительными витками 	I. Статическая характеристика $\dot{E}_{ср} = j\omega W_{ру} \frac{Z_{\mu T}}{\Delta g} \dot{J}_c W_c sh2\dot{\gamma}X,$ *Jc* - ток в сосредоточенной обмотке; *Wру, Wc* - число витков распределенной и сосредоточенной обмоток; *Δд* - изменение удельной магнитной проводимости между ферромагнитными стержнями. При учете магнитных потоков в основании и торцах магнитопровода		

		$$\dot{E}_{ср} = -j\omega W_{ру}\left\{\dot{\Phi}_0 \frac{sh\dot{\gamma}x}{\dot{\gamma}} + (\dot{\Phi} ch\dot{\gamma}x - \right.$$ $$- \frac{F_0}{Z_\mu} sh\dot{\gamma}x) \frac{sh\dot{\gamma}\delta l_c}{\dot{\gamma}\delta} - \frac{F_0}{\dot{\gamma} Z_\mu}(ch\dot{\gamma}x - 1) -$$ $$- \frac{\dot{F}_0 ch\dot{\gamma}x - \dot{\Phi}_0 Z_\mu sh\dot{\gamma}x}{Z_\mu \delta\, \dot{\gamma}\delta}(ch\dot{\gamma}l_c - 1) +$$ $$+ [(\dot{\Phi}_0 ch\dot{\gamma}x - \frac{F_0}{Z_\mu} \cdot sh\dot{\gamma}x) ch\dot{\gamma}\delta l_c -$$ $$- (\dot{F}_0 ch\dot{\gamma}x - \dot{\Phi}_0 Z_\mu sh\dot{\gamma}x \frac{sh\dot{\gamma}\delta l_c}{Z_\mu \delta}] \frac{sh\dot{\gamma}(x_м - x)}{\dot{\gamma}}$$ $$- [(\dot{F}_0 ch\dot{\gamma}x - \Phi_0 Z_\mu sh\dot{\gamma}x) ch\dot{\gamma}\delta l_c - (\Phi_0 ch\dot{\gamma}x -$$ $$\left. - \frac{\dot{F}_0}{Z_\mu} sh\dot{\gamma}x) Z_\mu sh\dot{\gamma}\delta l_c] \frac{ch\dot{\gamma}(x_м - x) - 1}{Z_\mu \dot{\gamma}}\right\},$$ δ - зазор между ферромагнитными стержнями и подвижным сердечником; $1c$ - длина подвижного сердечника; Φ_0 - поток в основании стержней магнитопровода; F_o – магнитное напряжение.		вателя; A_O-начальное значение выходной величины; ξ - степень нелинейности статической характеристики . 11. При учете нелинейности кривой намагничивания она аппроксимируется кубическим полиномом. 12. При определении температурной погрешности учтены электрические и геометрические параметры.

Таблица П1 (продолжение 13)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		2. Степень нелинейности характеристики $\xi_c\% = 50\left[\frac{sh2\beta\frac{X_{кс}}{X_м}(B_c - ch2\beta)}{sh2\beta(B_c - ch2\beta\frac{X_{кс}}{X_м})} - \frac{X_{кс}}{X_м}\right]$, $B_c = \frac{1}{K_\delta(K_T^2-1)}\left[(K_T^2+2K_TK_\delta+1)sh2\beta + (2K_T+K_T^2K_\delta-K_\delta)ch2\beta\right]$, $K_T = \frac{\gamma}{2Z_{\mu T}}$, $K_\delta = \frac{G_\delta\gamma}{2g}$ $G\delta$ - магнитная проводимость воздушного зазора. 3. Чувствительность $\dot{S}_{cx} = -j\omega W_c \dot{J}_c W_{ру}\frac{4g}{\dot{\gamma}}\cdot\frac{(\dot{B}_c ch2\dot{\beta}x - 1)\dot{K}_T}{(\dot{B}_c - ch2\dot{\beta}x)^2(\dot{K}_T^2-1)}$.		13. При определении погрешности от внешнего магнитного поля предполагается, что это поле переменно, совпадает по фазе и частоте с возбуждающим полем, а по направлению с рабочим потокосцеплением. Формула расчета огрешности $\gamma_{\Phi_{вн}} = \frac{\Psi_{вн}}{\Psi_{рм}}$ $\Psi вн$, $\Psi рм$ - потокосцепление от внешнего поля и рабочее потокосцепление. 14. При определении погрешности от внешних ферромагнитных масс, предполагается, что масса расположена вблизи магнитопровода и параллельно его стержням. При этом известна магнитная проводи-
	Дифференциальный ПРП с подвижным экраном и встречно включенными сосредоточенными на основании одинаковыми секциями, как обмотки возбуждения так и измерительной обмотки	I. Статическая характеристика $\dot{E}_{c_1c_2} = -j\omega W_{c_2}(\dot{\Phi}_{x_1} + \dot{\Phi}_{x_2})$, $x_1 = x_м - x$, $x_2 = x_м + x$ $\dot{\Phi}_{x_1} = \frac{\Delta\dot{A}_1}{\dot{\Delta}}e^{\dot{\gamma}x_1} + \frac{\Delta\dot{B}_1}{\dot{\Delta}}e^{-\dot{\gamma}x_1}$, $\dot{\Delta} = 4\left[ch2\dot{\gamma}x_м(Z_\mu^2\cdot 0{,}5Z_{\mu э} + \frac{\dot{\gamma}^2}{g^2}0{,}5Z_{\mu э} + 2Z_\mu\frac{\dot{\gamma}^2}{g^2}) + (2Z_{\mu T}\frac{\dot{\gamma}}{g}Z_{\mu э}0{,}5 + Z_\mu^2\frac{\dot{\gamma}}{g} + \frac{\dot{\gamma}^3}{g^3})sh2\dot{\gamma}x_м + (\frac{\dot{\gamma}^2}{g^2} - Z_\mu^2)\frac{Z_{\mu э}}{2}ch2\dot{\gamma}x\right]$, $\Delta\dot{A}_1 = -2\dot{F}\left[(Z_\mu + \frac{\dot{\gamma}}{g})(Z_{\mu э}\cdot 0{,}5 + \frac{\dot{\gamma}}{g})e^{\dot{\gamma}(x_м+x)}\right.$		

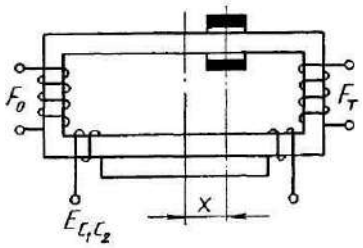
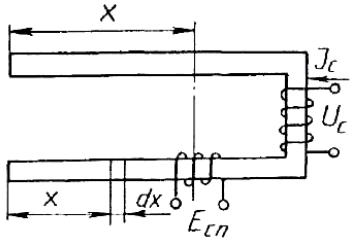
		$$-(Z_\mu-\frac{\dot\gamma}{g})\,0{,}5Z_{\mu э}e^{-\dot\gamma(x_н+x)}-\frac{\dot\gamma}{g}(\frac{\dot\gamma}{g}-Z_\mu)e^{-\dot\gamma(t_н-x)};$$ $$\Delta\dot E_1=2\dot F\left[e^{\dot\gamma(x_н-x)}(Z_\mu+\frac{\dot\gamma}{g})0{,}5Z_{\mu э}+(Z_{\mu т}-\right.$$ $$-\frac{\dot\gamma}{g})(\frac{\dot\gamma}{g}-0{,}5Z_{\mu э})\,e^{-\dot\gamma(x_н-x)}+e^{\dot\gamma(x_н-x)}(Z_\mu+$$ $$\left.+\frac{\dot\gamma}{g})\frac{\dot\gamma}{g}\right].$$ Поток Φ_{x2} находится аналогично.		мость *Gc* между полюсом преобразователя и массой. 15. Оценивается погрешность от неточности закона распределения числа витков распределенных обмоток для соответствующих типов преобразователей $$\gamma_{w_{ру}}=\frac{K_t}{W_{ру}x_м\sqrt{n}}$$

Таблица П1 (продолжение 14)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		2. Степень нелинейности характеристики $\xi_э\% = 50\left[\frac{sh2\beta\frac{X_{кэ}}{X_м}(B_э + ch2\beta)}{sh2\beta(B_э + ch2\beta\frac{X_{кэ}}{X_м})} - \frac{X_{кэ}}{X_м}\right],$ $B_э = \frac{2}{K_т^2 - 1}\left[(K_э K_т^2 + K_э + K_т)sh2\beta + (1 + K_т^2 + 4K_э K_т)ch2\beta\right], \quad K_э = \frac{\gamma}{g R_{μэ}}$ 3. Чувствительность $\dot{S}_{эх} = j\omega \dot{J}_c W_c W_{c2} g \frac{(\dot{B}_э ch2\beta x + 1)K_т^2}{(\dot{B}_э + ch2\beta x)^2(\dot{K}_т^2 - 1)}.$		*Kt* - коэффициент, учитывающий точность намотки; *n* - число слоев намотки. 16. Для расчета погрешности от магнитного гистерезиса дается общее выражение $\gamma_{нагг} = \frac{H_{0L} R_{μст} G\delta max}{H_м}$ *Нм* - наибольшая напряженность магнитного поля в магнитопроводе. 17. При использовании ЭВМ результаты расчета будут расходиться на (10-15) % с результатами эксперимента. 18. Выполнено моделирования статической характеристики преобразователя с подвижным сердечником на
	Недифференциальный ПРП с подвижной обмоткой  	I. Статическая характеристика $\dot{E}_{сп} = -j\frac{\omega W_п \dot{U}_c W_c g X}{R_в + R_в 0{,}5\gamma^2 X_м^2 + j\omega W_c^2 g X_м}.$ 2. Погрешность от нелинейности $\gamma_{ξ0м} = \frac{sh0{,}5\gamma X_м}{2sh\gamma X_м} - 0{,}25.$ $\gamma_{0ξ} = \frac{X}{X_м}\cdot\frac{K_F\left(\frac{X}{X_м} - 1\right)}{1 - K_F} - \frac{0{,}125K_F}{1 - K_F}$ $K_F = \frac{1}{1 + \frac{B_{IIм} S_{ст}}{a_{II} g X_м^2}}$		

				АВМ. 19. При расчете ПРП предлагается использовать установленные автором соотношения между параметрами преобразователя. Такие соотношения приводятся для преобразователей с подвижной обмоткой, подвижным сердечником и подвижным экраном. 20. В таблице приведены только те выражения для метрологических характеристик ПРП, которые

Таблица П1 (продолжение 15)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		3. Погрешность от нелинейности основной кривой намагничивания $B_{ПМ}$ - индукция, $a_{П}$ - удельная магнитная проводимость, 4. Погрешность от неточности воспроизведения закона распределения удельной магнитной проводимости g $$\gamma_{g0} = \frac{X}{X_M} \cdot \frac{h_0 + h_{10}}{h_0} \sqrt{\frac{h_{10}^3}{X^3}} \cdot \sqrt{K_N^5 \cdot N^5},$$ N - номер класса обработки; h - геометрические размеры магнитопровода; K_N - коэффициент влияния точности обработки. Наибольшая величина погрешности $$\gamma_{g0max} = K_N^2 N^2 h_{10} \frac{h_0 + h_{10}}{h_0 X_M} .$$ 5. Температурная погрешность $$\gamma_{\theta 0} = -\frac{X}{X_M} \Delta\theta \frac{R_{c0}^2 (1+0{,}5\beta^2) + \beta_0^2 (1+0{,}5\beta^2) R_c^2 0{,}5m + X_{m0}^2 \alpha \omega^2 W_c^4 g^2}{R_c^2 (1+0{,}5\beta^2)^2 + \omega^2 W_c^2 g^2 X_M^2}$$ $\Delta\theta$ - изменение температуры; β - коэффициент, характеризующий потери магнитного напряжения в магнитной линии $\beta = \gamma \cdot X_M$, α - температурный коэффициент расширения; m - магнитный температурный коэффициент. 6. Погрешность от внешнего магнитного поля $$\gamma_{гр.вн.0} = -\frac{B_{вн} \cdot h}{J_c W_c \mu_0}$$ 7. Погрешность от внешних ферромагнитных масс		приведены в работе в явной форме и решены относительно соответствующей характеристики. 21. Погрешности, не являющиеся специфическими для индуктивных преобразователей и приводимые в работе, в таблице не использованы. 22. Нелинейность характеристики намагничивания материала предлагается учитывать через зависимость удельного магнитного сопротивления $Q_M(H)$ материала от напряженности поля. Эта величина аппроксимируется математическим выражением по экспериментальной зависимости.

Таблица П1 (продолжение 16)

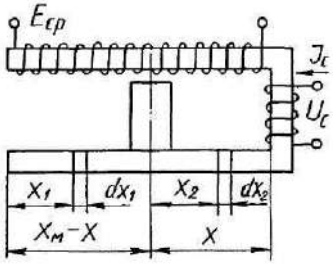
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		$\gamma_{m0} = \mu_0 \frac{h_1 + b K_s}{h_s 2g} \frac{X}{X_м}$, *hs* - расстояние между магнитопроводом и массой.		
	Недифференциальный ПРП с подвижным сердечником 	1. Статическая характеристика $E_{ср} = \frac{j\omega W_{pg} U_c W_c (G_\delta X + 0{,}5 X_м^2 g)}{R_g + R_g G_\delta 2 z_\mu X + R_g z_\mu g X_м^2 + \rightarrow}$ $\rightarrow + j\omega W_c^2 [g X_м + G_\delta (1 + z_\mu g X_м^2 - z_\mu g 2 X_\mu X + 2 g z_\mu X^2)]$ 2. Погрешность от нелинейности $\gamma_{\varepsilon см} = \frac{0{,}12}{0{,}4 + 0{,}5 \frac{X_м g}{G} + \frac{0{,}5}{z_\mu G_\delta X_м}}$ 3. Погрешность от нелинейности основной кривой намагничивания $\gamma_{c\varepsilon} = -\frac{2K_F}{1-2K_F}\left[\frac{X}{X_м}\left(\frac{X}{X_м} - 1\right) + 0{,}125\right]$ 4. Погрешность от неточности воспроизведения закона распределения удельной магнитной проводимости $\gamma_{gc} = \frac{\sqrt{K_N^5 N^5}}{X_м G_{\delta 0}}\left(\frac{X_м^2 g}{2} \cdot \frac{h_0 + h_{10}}{h_0}\sqrt{\frac{\Delta h_{10}^3}{X_м^3}} + X G_{\delta 0} \frac{\delta_0 + h_{10}}{\delta_0}\sqrt{\frac{\Delta h_{10}^3}{l_c^3}}\right)$, *Δh* - величина неровностей. Наибольшее значение погрешности $\gamma_{gc max} = \sqrt{K_N N^5 h_{10}^3}\left(\frac{X_м g}{G_\delta} \frac{h_0 + h_{10}}{h_0 \sqrt{X_м^3}} + \frac{\delta_0 + h_{10}}{\delta_0 \sqrt{l_c^3}}\right)$.		

Таблица П1 (продолжение 17)

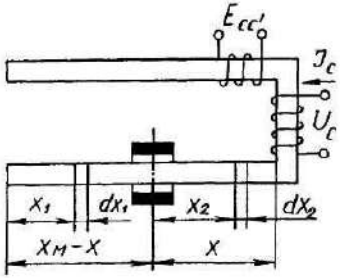
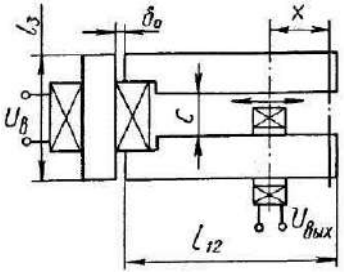
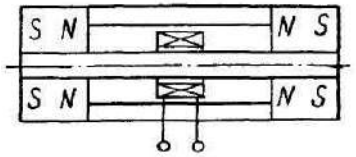
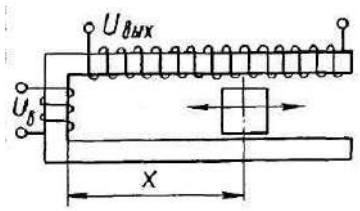
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		5. Погрешность от неточности воспроизведения закона распределения $R\mu$ $\gamma_{\tau\mu} = -\frac{2}{X_м}\frac{K_\Delta^2 h_1}{1+2K_\Delta}$, $K_\Delta = K_N \cdot N$. 6. Температурная погрешность $\gamma_{\theta c} \approx \Delta\theta \frac{(1+1{,}5\beta^2)\alpha - m\,0{,}5\beta^2}{1+0{,}5\beta^2+\beta^2\frac{G\delta}{gX_м}}$. 7. Погрешность от внешнего магнитного поля $\gamma_{\phi вн c} = \frac{B_{вн} X_м \delta}{2 J_c W_c l_c \mu_0}$. 8. Погрешность от внешних ферромагнитных масс $\gamma_{мс} = \frac{X_м}{4G\delta}\mu_0\frac{h_1 + bK_c}{h_3}$, *b* - ширина стержня магнитопровода.		
	Недифференциальный ПРП с подвижным экраном 	1. Погрешность от нелинейности основной кривой намагничивания $\gamma_{э\varepsilon} = \frac{X}{X_м}\frac{K_F(1-\frac{X}{X_м})}{1-K_F\left(1+\frac{1}{gR_{э\mu}X_м}\right)} - \frac{0{,}125K_F}{1-K_F\left(1+\frac{1}{gR_{э\mu}X_м}\right)}$. 2. Погрешность от неточности воспроизведения закона распределения удельной магнитной проводимости *g*: $\gamma_{gэ} = \frac{\sqrt{K_N^5 N^5 X}}{X_м}\cdot\frac{h_0+h_{10}}{h_0}\sqrt{\frac{\Delta h_{10}^3}{X^3}}$, Наибольшая величина погрешности $\gamma_{gэmax} = K_N^2 N^2 h_{10}\frac{h_0+h_{10}}{h_0 X_м}$.		

Таблица П1 (продолжение 18)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		4. Температурная погрешность $\gamma_{\theta э} = \frac{\Delta\theta\alpha_R}{\sqrt{1+\frac{\omega^2 g X_M^2}{R_э^2}}}$ 5. Погрешность от внешнего магнитного поля $\gamma_{\phi B_{н.э}} = \frac{B_{B_н} h}{J_c W_c \mu_0}$. 6. Погрешность от внешних ферромагнитных масс $\gamma_{мэ} = \mu_0 \frac{(h_1 + bK_s)x}{h_б 2g X_M}$.		
Белый М.И. [27,28] Решается уравнение Максвелла $\oint_L \dot{H}_L dl = \int\sigma\dot{E}ds + \int j_н ds$ для длинной магнитной линии с учетом нелинейности зависимости кривой намагничивания. Путем ряда допущений задача сводится	Преобразователь с подвижной рамкой и с сосредоточенными электрическими и распределенными магнитными параметрами 	I. Статическая характеристика $U_{вых} = \omega W_p \Phi_0 Arsh[KSn(\sqrt{a}x + c)]$; $\Phi_0 = \frac{2S}{\chi}$; $C = F_0(y_0, K)$; *Фо* - магнитный поток в ярме; α, γ - постоянные, определяемые по экспериментальным кривым намагничивания $a = \frac{\alpha\gamma g\, mx}{S}$ *Sn* - функция Якоби. *2.* Нелинейность характеристики $\varepsilon = \left\{1 - \frac{\Phi_0 Arsh[KSn(\sqrt{a}X + c)]}{\Phi_1 + K(X + X_1)}\right\} \cdot 100\%$. 3. Чувствительность преобразователя	I **вариант.** Заданы намагничивающая сила *FH* и максимальное напряжение выходного сигнала. 1. По максимальному выходному напряжение определяется магнитный поток в нулевом сечении. *2.* Графически или аналитически определяются проводимости рассеяния и разность магнитных потенциалов в нулевом сечении. 3. Известными методами или электростатическим моделированием определяется проводимость воздушного за-	1. Учет нелинейности характеристики намагничивания производится путем аппроксимации ее функцией гиперболического синуса. 2. Влияние величины воздушного зазора на магнитный поток учитывается по экспериментальным зависимостям. 3. В качестве статической характеристики преобразователя, в основном, принимает-

к магнитостатической и распределение магнитного потока вдоль магнитной цепи описывается нелинейными дифференциальными		$S_u = \frac{K}{\sqrt{a}\, ch\, UK}$, $K = \frac{Cos(\varphi - \varphi_i) Zx}{\Phi_0 \omega W_p Sin\varphi_x Zi}$, φ_i, φ_x - аргументы сопротивлений Z_i и Z_x.	зора. 4. Рассчитывается ряд коэффициентов, предложенных автором, с использованием таблиц специальных функций. 5. Задается ряд значений магнитных потоков и по точкам строится статическая характеристика распределения магнитного потока в функции входной координаты. 6. Определяется магнитное сопротивление зазора и его величина.	ся зависимость магнитного потока от координаты *X*. 4. Для преобразователя с подвижным сердечником пренебрегается магнитным сопротивлением магнитопровода.

Таблица П1 (продолжение 19)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
уравнениями. Исследуются методы решения таких дифференциальных уравнений: метод возмущений, метод гармонического анализа и предложенный автором метод специальных функций.		4. Тяговое усилие $F_i = 2B_m J_{i\phi} b W_p$, B_m - эффективное значение магнитной индукции в воздушном зазоре; $J_{i\phi}$ - активная составляющая тока рамки; b - длина стороны витка.	7. Вычисляется нелинейность характеристики преобразования в заданном диапазоне перемещений. **II вариант.** Задан магнитный поток в конце цепи. 1. Подбирается требуемое сопротивление воздушного зазора, для чего строится семейство зависимостей распределения магнитного потока для ряда произвольно заданных значений зазора. 2. Определяется величина намагничивающей силы, необходимая для получения заданной характеристики. **III вариант.** Заданы намагничивающая сила, магнитный поток в конце цепи и форма цепи. 1. Определяется удельная проводимость воздушного зазора. 2. Определяется расстояние между стержнями магнитной	5. Нелинейность характеристики преобразователя оценивается по зависимости. 6. Рассмотрен расчет ряда погрешностей от неточности изготовления и сборки преобразователя. 7. При расчете погрешностей коэффициенты влияния отдельных составляющих цениваются экспериментально. 8. В качестве результата работы автор указывает на факт получения расчетных формул для определения основных характеристик преобразователей: статической характеристики, чувствительности, разрешающей способности, тягового уси-
	Магнитоэлектрический преобразователь с распределенными магнитными и сосредоточенными электрическими параметрами 	1. Статическая характеристика $\Phi_n = \Phi_\tau(X) + \Phi_{\bar{\tau}}(X)$, $\Phi_I(X)$ и $\Phi_{II}(X)$- магнитные потоки, определяемые графоаналитическими методами расчета магнитных цепей. 2. Нелинейность характеристики $\varepsilon = \left[1 - \frac{\Phi_p(X)}{\Phi_{np}(X)}\right] \cdot 100\%$.		
	Преобразователь с распределенными электрическими и магнитными параметрами 	1. Статическая характеристика $L = \frac{W^2}{G(G_0+G_e+g_m l_K)}\left[G(G_e+0{,}5g_m l_K)x\right.$ $\left. x\,(G_e+0{,}5g_m l_K) - g_m l_K\,(G_0+G_e+g_m l_K)\right]$ Go , Ge - проводимости левого и правого стыков магнитной цепи.		

			цепи. 3. Определяется длина стержней. Основной задачей расчета является нахождение распределения магнитного потока Фр(x) в магнитной цепи в функции координаты *X*.	лия и др. 9. При расчете магнитных сопротивлений и проводимостей участков магнитной цепи используются известные методы расчета магнитных цепей, в частности, метод Б.К.Буля. 10. ЭВМ используется для решения дифференциального уравнения, описывающего распределение магнитного потока вдоль цепи методом специальных функций.

Таблица П1 (продолжение 20)

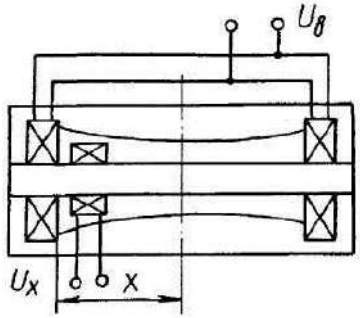
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
	Электромагнитный функциональный преобразователь с распределенными параметрами (ферродинамический преобразователь)  	I. Статическая характеристика: В явном виде не выражается, определяется закон изменения магнитной проводимости зазоров, необходимый для получения требуемой функциональной зависимости характеристики преобразователя $g_{mx} = \frac{g_{mo}\,\Phi_x'}{\Phi_0' + g_{mo}\int_0^x z_{mx}\,\Phi_x\,dx}$. Характеристики общие для рассматриваемых преобразователей: 1. Относительная стандартная погрешность от изменения температуры $(\sigma_{u_в})_t = \sqrt{(1-\frac{a}{2b})^2\sigma^2(\alpha_x) + (\frac{a}{2b})^2\sigma^2(\alpha_{gm})}$ $\overline{2\tau'_{sg_m}\frac{a}{2b}(1-\frac{a}{2b})\sigma(\alpha_s)\sigma(\alpha_{gm}) +}$ $\overline{+(\frac{a}{2b})^2\sigma^2(\alpha_\alpha)+(1-\frac{a}{2b})^2\sigma^2(\alpha_\gamma)+(\frac{c}{b})^2\sigma^2(\alpha_c)\Delta\theta},$ α - температурный коэффициент данного параметра; $\Delta\theta$ - изменение температуры окружающей среды. $a = \sqrt{\frac{\alpha\gamma g_m}{s}\cdot x}$, $b = Arsh\,[th(a+c)ch^2(a+c)\sqrt{1+th^2(a+c)}$, C - постоянная величина. 2. Динамическая погрешность Преобразователь с подвижной рамкой (с сосредоточенными электрическими параметрами)		11. В работе обсуждаются вопросы расчета допусков на элементы преобразователя. Конкретного алгоритма расчета не приведено. 12. Рассмотрены погрешности от нестабильности источника питания преобразователя по частоте и амплитуде.

Таблица П1 (продолжение 21)

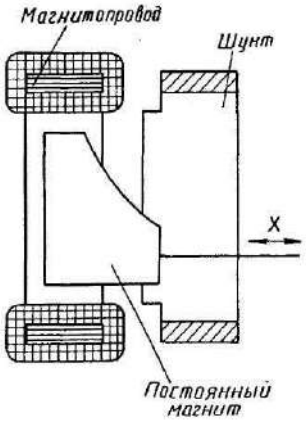
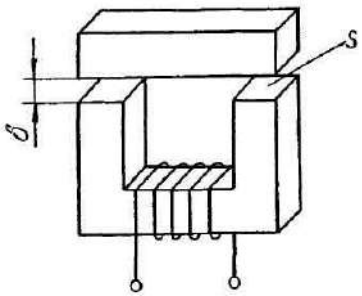
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		$$\gamma = \frac{\Omega \cdot 100\%}{1 - \frac{\Phi_0 - g_m M_0 X_0}{g_m M_0 X_м}},$$ Ω - угловая частота колебаний; Φ, M, g - магнитный поток, магнитное напряжение и магнитная проводимость участков магнитопровода. Преобразователь с распределенными электрическими и магнитными параметрами $$\gamma = \frac{\Omega}{\omega} \cdot \frac{X_м (2aX_0 + b) \cdot 100\%}{a(X_0 + X_m)^2 + b(X_0 + X_m) + c}$$		
Жиров В.Г. [76,77] Метод расчета магнитной цепи через магнитные сопротивления и проводимости ее участков. Графоаналитический метод исследования магнитных цепей. Уточнение коэффициен-	Магнитомодуляционный функциональный преобразователь с профилированным магнитом 	I. Функциональная статическая характеристика $$J = \frac{1}{D}\left\{\left(\frac{2\sqrt{2}W}{l_c} + \frac{X_н}{A\mu_d}\right)\frac{K_в B_м}{2S_c}\int_0^x \varphi(x)dx + \right.$$ $$\left. + \frac{1}{A\mu_d}\sqrt{U^2 D - \left(\frac{K_в B_м R}{2S_c}\int_0^x \varphi(x)dx\right)^2}\right\},$$ $$B_м = \frac{B_z}{\frac{\mu_z S_м}{l_м \Sigma G} + 1},$$ $$K_в = \frac{S}{\mu_{d_0}}, \quad A = \sqrt{2}\omega W s_c,$$ $b = \varphi(x)$ - уравнение профиля магнита; J - ток в нагрузке; x - входное перемещение; Sc - сечение магнитопровода; $l_м$ - высота магнита; $s_м$ - нейтральное	Детальная методика расчета преобразователя не рассматривается. Приводится ряд рекомендаций по выполнению соотношений между отдельными конструктивными параметрами преобразователя.	1. Магнитная проницаемость принята постоянной. 2. Кривые индукций, напряженности поля, напряжения и тока заменены эквивалентными синусоидами. 3. Полученные выражения для метрологических характеристик преобразователя не разрешены окончательно относительно конструктивных параметров

Таблица П1 (продолжение 22)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
тов рассеяния магнитного потока методом математического моделирования.		сечение магнита; ΣG - величина внешней проводимости; μ_r - обратимая магнитная проницаемость; B_r - остаточная индукция; μ_d –дифференциальная магнитная проницаемость; $Xн$ - реактивная составляющая сопротивления нагрузки; S - крутизна характеристики дросселя. 2. Чувствительность по току $$S_J = \frac{K_в B_м \varphi(x)}{2S_c\left[\frac{2\sqrt{2}W}{l_c} + \frac{1}{A\mu_d}\left(\frac{0{,}85R^2}{\sqrt{X_н^2 + 0{,}28R^2}} + X_н\right)\right]}$$ 3. Температурная погрешность $$\gamma_t = \frac{J_0}{J_m}\left(\frac{X_{др}^2 T_к \mu_d + R^2 T_к R}{X_{др}^2 + R^2}\right) +$$ $$+ \frac{J - J_0}{J_m}\left(T_к B_н - T_к \mu_d + \frac{T_к \mu_d - T_к R}{1 + 0{,}63\frac{X_{др}}{R}}\right),$$ $$X_{др} = \frac{4\omega W^2 S_c \mu_d}{l_c}$$ R - активное сопротивление цепи. 4. Динамическая погрешность $$\gamma_{дин.} = \frac{We^{-Rt/L}\cdot 100\%}{LKf_м(x)}\int_0^t \frac{d}{dt}\left(f(x)\right)e^{Rt/L}dt,$$ $$L = \frac{W^2 S_c \mu_d}{l_c}, \quad K = \frac{1}{2S_c a_1}.$$ 5. Рассматриваются также технологические погрешности от неточности изготовления и сборки магнитной цепи и погрешность от колебания напряжения и частоты питания.		преобразователя. 4. Детальное аналитическое исследование магнитной цепи с учетом потоков рассеяния, выпучивания поля в зазорах и нелинейности намагничивания не произведено.

Таблица П1 (продолжение 23)

Рашкович М.П. Рашкович П.М. Шкловский Б.И. [192] Метод расчета магнитного потока через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода. Использование схем замещения магнитной цепи.	Индуктивный преобразователь 	I. Полное сопротивление катушки $$Z = \omega \frac{W^2}{R_{\mu ст} + 2\frac{\delta}{S\mu_0}} \approx \frac{\mu_0 \omega W^2 S}{\delta}.$$ 2. Чувствительность $$S_{ип} = \frac{\Delta Z}{\Delta A},$$ ΔA - изменение измеряемого перемещения. 3. Сила, воздействующая на якорь $$Q = k\frac{\Phi^2}{\sigma^2 S},$$ κ - коэффициент пропорциональности; σ - коэффициент рассеяния потока	Исходные данные: размеры преобразователя, материал магнитопровода, пределы изменения зазора, параметры катушки (провод, число витков, сопротивление). Рассчитывается зависимость полного сопротивления от величины зазора. 1. Задаем величину зазора. 2. Определяем параметры поля выпучивания. 3. Определяем величины магнитных сопротивлений воздушного зазора и потока выпучивания. 4. Задаваясь индукцией находим комплексное сопротивление участков магнитопровода. 5. Рассчитываем ампервитки катушки и полное сопротивление преобразователя. 6. Последовательно задавая разные зазоры строим зависимость полного сопротивления преобразователя от зазора.	1. Расчет магнитной проводимости воздушных зазоров изложен со ссылкой на Г.Ротерса и Б.К. Буля. 2. При определении магнитного сопротивления стальных участков используются экспериментальные зависимости удельных магнитных сопротивлений Q_K и Q_X от величины индукции. 3. Анализ метрологических характеристик преобразователя не проводится. 4. При расчете зубчатого преобразователя используется понятие фиктивного зазора.

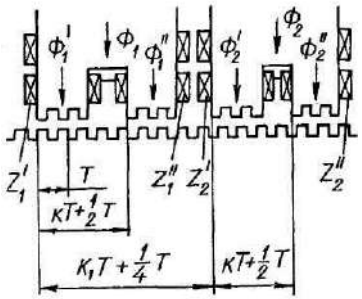
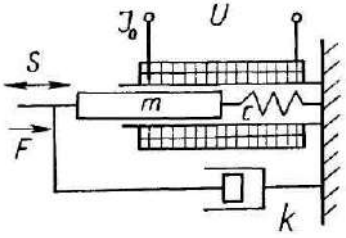
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
	Преобразователь с зубчатым якорем 	Напряжение на измерительных обмотках $U_{ab} = 2\omega W \Delta\Phi_m \cos\omega t \sin 2\pi \frac{\delta}{T}$ $U_{cd} = 2\omega W \Delta\Phi_m \cos\omega t \cos 2\pi \frac{\delta}{T}$ $U_{вых} = 2\omega W \Delta\Phi_м \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T}\delta\right)$ ***ΔΦ*** - половина амплитудного значения потоков ***Φ₁ (Φ₂)***; ***δ*** - сдвиг якоря относительно сердечников при возбуждении токами, сдвинутыми на π/2 Фиктивный зазор $\delta' = \frac{\delta_0}{(1-\frac{l}{a})(0{,}5+k_T)+0{,}6k_T(1+\frac{l}{a})+k_c k_\delta}$, $k_T = \frac{\delta_0 \ln(1+3{,}5\frac{a}{\delta_0})}{3{,}5b}$, $k_\delta = \frac{\delta_0 \ln(1+3\frac{a}{\delta_0})}{\pi a}$, *a* - ширина зуба.		

Таблица П1 (продолжение 24)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Kautsch R [281,282] Метод расчета электрических цепей при гармоническом характере изменения напряжения и тока. Решение дифференциального уравнения, описывающего движение якоря и изменение электрических сигналов.	Преобразователь с протяжным якорем и катушкой 	I. Индуктивность преобразователя $$L=\frac{\mu_0\mu W^2 A}{l},$$ A - площадь магнитного потока; l - средняя длина магнитных силовых линий; W - число витков обмотки. 2. Напряжение на обмотке при $J_0=\hat{J}\cos\omega_h t$, $s=\hat{s}\cos(\omega_m t+\varphi)$: $$U=(1+\xi)6J_0 v-L\Sigma\omega i_\omega+E-\omega_h L\hat{J}_0\sin\omega_h t$$ $$\xi=\frac{\omega_h}{\omega_m}\tan\omega_h t\cot(\omega_m t+\varphi),\quad v=\frac{ds}{dt}.$$ $$v=\frac{\cot(\omega_m t+\varphi)}{\omega_m^2 L_0},$$ 3. Уравнение движения якоря $$F=(c+6^2\hat{J}_0^2\omega_m v)v+6J_0\Sigma i_w-$$ $$-\frac{1}{2}6\hat{J}_0^2\cos^2\omega_h t,$$ $6=\frac{\Delta L}{\Delta s}$ - чувствительность 4. Электромагнитная сила $$F=-\frac{1}{2}6\hat{J}_0^2\cos^2\omega_h t.$$ 5. Эквивалентная относительная погрешность от напряжения шумов $$\left|\frac{S_R}{S_{max}}\right|=\frac{U_R}{\frac{\omega_h\Delta L_{max}}{(R_a+|Z_G|)^2}\cdot E},$$	Методика расчета преобразователя не обсуждается. Приводятся ряд рекомендаций по конструированию преобразователя: I. Для получения линейной характеристики длина якоря берется малой по сравнению с длиной катушки. 2. Общая длина датчика больше измеряемого перемещения во много раз. 3. Для повышения линейности, чувствительности и уменьшения температурной погрешности катушки следует включать так, чтобы их потоки в сердечнике были противоположны (для дифференциального датчика).	1. Кроме одинарного датчика рассматривается также дифференциальный датчик, каждая половина которого описывается уравнениями аналогичными уравнениям для одинарного датчика. 2. Расчет магнитной цепи датчика не рассматривается. 3. Полученные уравнения справедливы только при гармонических вибрациях подвижного якоря датчика. 4. Анализ метрологических характеристик преобразователя не производится. 5. Указывается на возможность измерения индуктивными датчиками перемещений до 10^{-6} мм.

		Z_G - полное сопротивление датчика; Ra - сопротивление схемы включения; E - напряжение питания.		6. Указывается, что эквивалентная погрешность от сопротивления шумов составляет около $0{,}7 \cdot 10^{-7}$ мм.

Таблица П1 (продолжение 25)

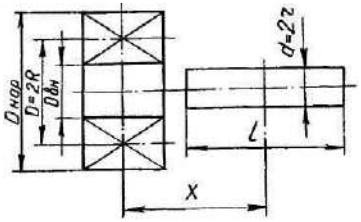
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Моисеев В.С. [160] Методы теории поля и использование понятия векторного потенциала.	Индуктивный соленоидный датчик 	I. Функция преобразования: С учетом неоднородности магнитного поля в поперечном сечении сердечника $$L=\frac{\pi}{2}\mu_0 W^2R^2+\mu_0 W^2\sqrt{R_r}(\bar{\mu}_c-1)\left[\left(\frac{2}{k}-k\right)K-\frac{2}{k}E\right]-L_0\left\{1+\frac{2(\bar{\mu}_c-1)}{\pi}\sqrt{\frac{r}{R}}\left[\left(\frac{2}{k}-k\right)K-\frac{2}{k}E\right]\right\},$$ где $$L_0=\frac{\pi}{2}\mu_0 W^2R^2,$$ $$\bar{\mu}_c=\frac{\mu_c}{1+\frac{N\mu}{4\pi}(\mu_c-1)},$$ $$k=\sqrt{\frac{4rR}{X^2+(R+r)^2}},$$ L - индуктивность обмотки преобразователя; $K\ (k1\ \pi/2)$ - полный эллиптический интеграл первого рода; $E\ (k1\ \pi/2)$ - полный эллиптический интеграл второго рода; $N\mu$ - магнитометрический коэффициент размагничивания сердечника. Без учета неоднородности поля $$L=L_0\left[1+(\bar{\mu}_c-1)\frac{r^2R^2}{(\sqrt{X^2+R^2})^3}\right].$$ 2. Чувствительность $$K_x=-\frac{3L_0r^2(\bar{\mu}_c-1)}{R^3\left[\left(\frac{X}{R}\right)^2+1\right]\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2+1}}\cdot\left(\frac{X}{R}\right).$$	Методика расчета не рассматривается. Приведен ряд рекомендаций по выбору соотношений между размерами катушки и сердечника, обеспечение которых позволяет получить требуемый диапазон измерения при допустимой нелинейности характеристики.	1. При анализе учтен фактор размагничивания разомкнутого сердечника. 2. Магнитная проницаемость в объеме сердечника принята постоянной. 3. Нелинейность характеристики оценивалась экспериментально. 4. В работе проведены обширные экспериментальные исследования соленоидного преобразователя по выбору его конструктивных параметров с целью оптимизации метрологических характеристик.

Таблица П1 (продолжение 26)

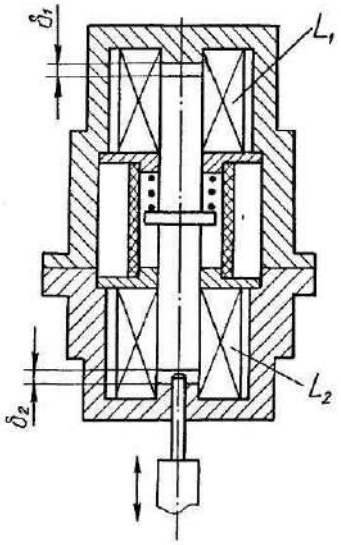
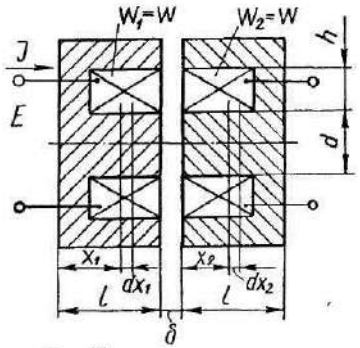
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Дадашева Р.Б. [68] Метод расчета магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода.	Индуктивный преобразователь малых линейных перемещений 	$L_1 = \frac{W_1^2}{\frac{\delta_1}{\mu_0 S} + \frac{1}{\mu\mu_0 S}\left(l_1\frac{S}{S_1} + l_3\right)}$, $L_2 = \frac{W_2^2}{\frac{\delta_2}{\mu_0 S} + \frac{1}{\mu\mu_0 S}\left(l_1\frac{S}{S} + l_2\right)}$. 1. Статическая характеристика Выходная э.д.с. $\dot{E}_2 = -j\omega\frac{W^2}{W_1}U\frac{(\delta_2-\delta_1)\mu L_\mu}{\delta_0\mu + 2a}\cdot\frac{2R - j\omega L_\mu}{4R^2+\omega^2L_\mu^2}$; где $L_\mu = W_1^2\mu\mu_0 S\frac{\delta_0\mu+2a}{(\delta_1\mu+a)(\delta_2\mu+a)}$, $\delta_0 = \delta_1+\delta_2$, $a = l_1 S/S_1 + l_3$, *2R* - сопротивление обмотки возбуждения; *li* , *Si* - длина и площадь поперечного сечения отдельных участков магнитопровода. 2. Чувствительность $S_{\Delta\delta} = \frac{B[D^2 + R^2\mu^4(\Delta\delta)^4]}{C\sqrt{C}}$ $B = 2A\mu^2\mu_0 W_1^2 S$, $A = \omega U W_2/W_1$, $C = D^2 - 4R^2\mu^2(\delta_0\mu+2a)^2(\Delta\delta)^2 + R^2\mu^4(\Delta\delta)^4$, $D^2 = R^2(\delta_0\mu+2a)^4 + 4\omega^2W_1^4\mu^2\mu_0^2S^2(\delta_0\mu+2a)^2$. 3. Температурная погрешность $\eta_t\% = \left(\frac{\mu_t L_{\mu t}}{\mu_0 L_{\mu 20}}\cdot\frac{\delta\mu_{20}+2a}{\delta_0\mu_t+2a}\sqrt{\frac{4R_{20}^2+\omega^2L^2\mu_{20}}{4R_t^2+\omega^2L^2\mu_t}}-1\right)\times$ $\times 100\%$	Расчет преобразователя не рассматривается и методика не предлагается.	Не учитываются потоки рассеяния, потери мощности на гистерезис и вихревые токи. Выпучиванием поля в зазоре пренебрегается. 3. При исследовании температурной погрешности принята аппроксимация $\mu_t = \mu_{H0} + k_\mu t$, при этом для $-60°C \le t \le 60°C$ $k_\mu = 0{,}1\ (°C)^{-1}$ для ст. 3; $k\mu$ = 0,2 (1/°C) для стали 10; $k\mu$=0,25 (1/°C) для стали 45; $k\mu$ = 0,3 (1/°C); для стали 4х9С2.

Таблица П1 (продолжение 27)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Лиманов И.А. [147] Метод расчета магнитных сопротивлений, магнитных проводимостей и магнитных потоков в магнитной цепи. Использованы упрощенные картины распределения магнитных потоков.	а) Индуктивный преобразователь с двумя цилиндрическими магнитопроводами  б) Измерительный преобразователь с подвижным сердечником и экранами	I. Статическая характеристика: а) взаимоиндуктивность обмоток $M_{12}=-\frac{W_1 W_2 l}{z_\mu}\cdot\frac{ch2\beta-1}{2\beta(sh2\beta+K_\delta ch^2\beta)}$, $z_\mu=z_{\mu_1}=z_{\mu_2}=Q_\mu\frac{\delta}{\pi d_1^2}$, $g=\mu_0\frac{\pi d_1}{h}$; $\beta=\gamma l$; $K_\delta=Z_{\mu\delta}\,g/\gamma$; $\gamma=\sqrt{z_\mu g}$; $Q\mu$ – удельное сопротивление материала сердечника; g, $Z\mu$ -удельные магнитная проводимость зазора и магнитное сопротивление сердечника; $Z\mu\delta$ - магнитное сопротивление воздушного зазора, б) выходное напряжение $\dot{U}_{вых}=j\dot{U}\left\{\frac{2K_\beta x(1-x^2)^2-4K_э x(1-x^2)^2}{[K_\beta(1-x^2)^2+2K_э(1+x^2)]^2+4(1-x^2)^2}-\right.$ $\left.-j\frac{4K_э K_\beta x(1-x^2)^2+8K_э^2 x(1+x^2)+4x(1-x^2)^2}{[K_\beta(1-x^2)^2+2K_э(1+x^2)]^2+4(1-x^2)^2}\right\}$, $K_\beta=\frac{z_\mu R}{\omega W_y^2 l}\cdot\frac{\beta(sh2\beta+K_\delta ch^2\beta)}{sh^2\beta-\beta sh2\beta+(\frac{1}{2}sh2\beta-\beta ch^2\beta)K_\delta}$ $K_э=\frac{\omega W_{yэ}^2 l}{z_\mu(R_э+R_{нэ})}\cdot\frac{sh^2\beta-\beta sh2\beta+(\frac{1}{2}sh^2\beta-\beta ch^2\beta)K_\delta}{\beta(sh2\beta+K_\delta ch^2\beta)}$ $2\delta o$- максимальный зазор; ω - круговая частота; *W* - число витков измерительных обмоток; *Wэ* - число витков экранных обмоток; *S* - площадь воздуш-	1. Исходным уравнением для расчета является статическая характеристика. Определяются оптимальные геометрические соотношения магнитопровода, числа витков обмоток и оптимальный режим. 2. Рассматривается проверочный расчет для заданной схемы преобразователя. Конкретные расчетные выражения с использованием метрологических характеристик не приводятся. 3. Последовательность расчета: Задано: напряжение *U* , частота ω, максимальный диапазон перемещений $2\sigma_0$, степень нелинейности ε %, тип магнитопровода и материал, диаметр магнитопровода и индукция *Bm* Определяются: Размеры магнитопровода (из геометрических соотношений к диаметру). Магнитный поток по величине индукции. Магнитодвижущая сила.	I. Нелинейность кривой намагничивания не учитывается. Потоки выпучивания в непосредственной близости от воздушных зазоров не учитываются. В ряде случаев магнитным сопротивлением сердечника пренебрегается. Предполагается, что между обмотками пар сердечников связь отсутствует. В качестве статической характеристики для преобразователя а) рассматривается зависимость взаимоиндуктивности от перемещения, а для преобразователя б) зависимость напряжения на

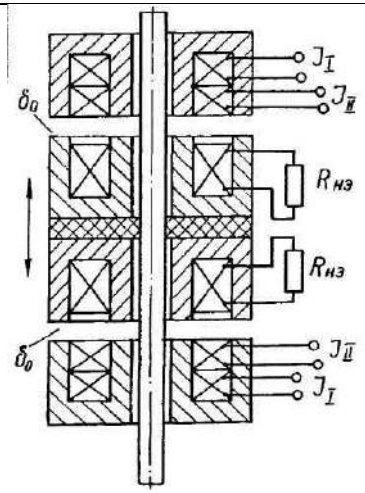
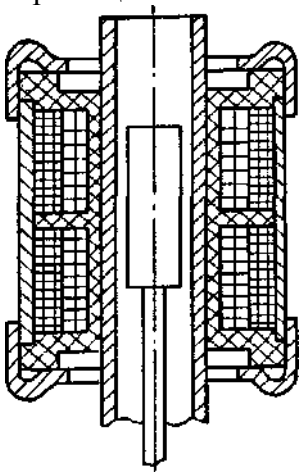
	 Средняя часть является подвижной и обмотки на ней могут быть короткозамкнутыми витками (экранами).	ного зазора; *Rэ* -активное сопротивление экранных обмоток; *X=X/δв* - относительное перемещение подвижной части. 2. Степень нелинейности характеристики $\varepsilon\% = \left[1{,}6\,\frac{\sqrt{(0{,}36K_в - 2K_э)^2 + (2K_э K_в + 51K_э^2 + 2)^2 \cdot 0{,}8}}{(0{,}36K_в + 9{,}1K_э)^2 + 4}\right] \times 100\%$	Число витков катушек, ток, диаметр провода. Число витков экрана и диаметр провода (находятся из условия обеспечения наилучшей линейности характеристики).	измерительной обмотке. Приведено выражение для погрешности влияния внешнего магнитного поля с индукцией *Bвн* $\gamma_{Bн} = \frac{B_{\delta н}}{B} = \frac{2B_{\delta н} S_н \delta}{JW\mu_0 S_\delta}$ и для динамической погрешности $\gamma_g = \frac{\Delta X_м}{X_м}\left[\frac{\Omega \sin(\omega t+\varphi)\cos\Omega t}{\omega\cos(\omega t+\varphi)\sin\Omega t} + 1\right]$, где ω - круговая частота гармонических колебаний якоря преобразователя.

Таблица П1 (продолжение 28)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		3. Чувствительность к перемещению $S=\frac{dU_{вых}}{dx}=$ $=\frac{3K_8X^{12}-2K_1X^{10}+K_2X^8+4K_3X^6-K_4X^4-2K_5X^2-K_6}{K_8X^8-4K_8X^6+2K_7X^4-4K_8X^2+K_9)^2}$, $K_1=K_8(7-5K_3^2)$, $K_2=18K_8^2+23K_8+32K_3^4+44K_3^2+12$, $K_3=2K_3^4+6K_3^2-5K_8-8$, $K_4=16K_3^2-40K_3^4-5K_8^2-8$, $K_5=20K_3^4-4K_3^2-K_8^2-16$, $K_6=8K_3^4+12K_3^2+K_8^2+4$, $K_7=3K_8^2+2K_3^2+2$, $K_8=K_8^2+2K_3^2-2$, $K_9=K_8^2+4K_3^2+4$. 4. Тяговое усилие $F=\frac{U^2X}{\omega^2W^2\mu_0S}\times$ $\frac{128X^{10}-(K_3+134)X^8-8K_3X^6+(524-6K_3)X^4+(8K_3+128)X^2+}{\left\{[2K_8(1-X^2)^2+4K_3(1+X^2)]^2+16(1-X^2)^2\right\}^2}$ $\rightarrow$ $\rightarrow\frac{+7K_3-134}{}$. 5. Температурная погрешность: От изменения активного сопротивления обмоток $\gamma_R'=-\alpha_R\frac{2K_8^2(1-X^2)^2}{K_8^2(1-X^2)^2+4}\cdot\Delta\theta$, От изменения магнитного сопротивления сердечника $\gamma_{Z_\mu}'=-\alpha_\mu\frac{Z_\mu}{Z_\mu\delta+Z_\mu}\cdot\frac{2K_8^2(1-X^2)^2}{K_8^2(1-X^2)^2+4}\cdot\Delta\theta$, От изменения магнитной проводимости зазора $\gamma_G'=\alpha_G\frac{2K_8^2(1-X^2)^2}{K_8^2(1-X^2)^2+4}\cdot\Delta\theta$.		

Таблица П1 (продолжение 29)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Востриков Ю.А. [52] Методы теории вероятности и математической статистики.	Дифференциально-трансформа-торный преобразователь перемещений 	Характеристика преобразователя $M(x) = \Delta m_0 + (2m_1 + \Delta m_1)x + \Delta m_2 x^2 + (2m_3 + \Delta m_3)x^3 + \dots,$ где $M(x)$ - взаимная индуктивность между обмотками; X - перемещение сердечника; m_i –коэффициенты разложения; Δm_i - отклонения коэффициентов разложения вследствие технологических допусков на параметры преобразователя $\varepsilon(x) = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 x - (\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_3)x^2 + \Delta\varepsilon_3 x^3 + \dots,$ где $\varepsilon(x)$ - угол потерь; ε_i - коэффициенты разложения $\dot{M}(x) = M(x)e^{-j\varepsilon} + \Delta M_н e^{-j\varepsilon_н}$.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются.	Коэффициенты разложения m_i, ε_i в работе не определяются. Расчет и анализ магнитной цепи преобразователя автором не рассматривается. Указывается, что для обеспечения взаимозаменяемости преобразователей необходимо обеспечить подбор их основных конструктивных параметров на основе экспериментального исследования зависимости функциональных параметров от конструкции.
Рыбиков Н.Н. [202] Методы теории поля.	Индуктивный соленоидный преобразователь	1. Градуировочная характеристика	Методика расчета преобразователя не рассматривается.	Поле в поперечном сечении сердечника принято однородным.

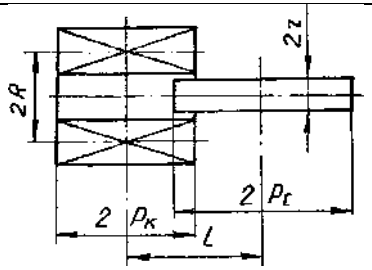
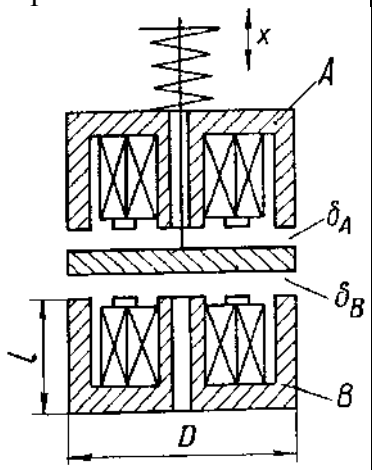
		$L = L_0 + A\left[\sqrt{(\gamma+\rho_1)^2+1} + \sqrt{(\gamma-\rho_1)^2+1} - \sqrt{(\gamma+\rho_2)^2+1} - \sqrt{(\gamma-\rho_2)^2+1}\right]$, $\gamma = \frac{l}{R}$, $\rho_1 = \frac{\rho_c+\rho_к}{R}$, $\rho_2 = \frac{\rho_c-\rho_к}{R}$, $A = \frac{\pi z^2}{\delta}\mu_0(\bar{\mu}_c - 1)\frac{W^2R}{\rho_c\rho_к}$, $L_0 = \frac{\pi^2 W^2 d\,(1-\frac{2}{3}Q+\frac{1}{3}Q^2)\cdot 10^{-7}}{0{,}45+0{,}375Q+a}$, $d = 2R$, $a = \rho_к / R$ Q – относительная толщина катушки, $\bar{\mu}_c = \frac{\mu_c}{1+N\mu(\mu_c-1)}$, $N\mu$ - коэффициент размагничивания сердечника. 2. Чувствительность преобразователя $S = \frac{dL}{d\gamma} = \frac{A}{2}\left[\frac{1}{(\gamma+\rho_2)^2+1} + \frac{1}{(\gamma-\rho_2)^2+1} - \frac{1}{(\gamma-\rho_1)^2+1} - \frac{1}{(\gamma+\rho_1)^2+1} - 4\right]$, наибольшая чувствительность $S_{max} = 2A\left[\frac{2}{(\rho_1-\rho_2)^2+4} - 1\right]$. 3. Относительная погрешность от нелинейности $\delta L_н = \frac{L'-L}{L_0}$, $L' = S'\gamma - S'\frac{\rho_1+\rho_2}{2} + \frac{A}{2}\left[\sqrt{(3\rho_1+\rho_2)^2+4} - \sqrt{(\rho_1+3\rho_2)^2+4}\right]$ - линеаризованная характеристика, $L_0 = \frac{A}{2}\left[\sqrt{(3\rho_1+\rho_2)^2+4} - \sqrt{(\rho_1+3\rho_2)^2+4}\right]$		Магнитная проницаемость принята постоянной во всем объеме сердечника. Линеаризованная характеристика преобразователя выбирается с учетом минимизации нелинейности. 1. Учтен фактор размагничивания сердечника. Линеаризованная характеристика проводится через точку реальной характеристики, соответствующую наибольшей чувствительности.

Таблица П1 (продолжение 30)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Кондрашова Л. А. [116] Графоаналитический метод расчета магнитных проводимостей участков магнитопровода и зазоров, основанный на выводах и рекомендациях Б.К.Буля.	Дифференциальный индукционный датчик линейных перемещений с двумя цилиндрическими магнитопроводами А и В и переменной длиной зазоров 	I. Характеристика "вход-выход" $$E_c = U\frac{W_c}{W_в}\left\{\frac{1+\frac{1}{6}G_S Z_{\mu A}}{\left[1+\frac{Z_{\mu в}+Z_{\mu в e}}{Z_{\mu A}+Z_{\mu A e}}\right]\left[1+\frac{1}{3}G_S\left(\frac{Z_{\mu A}}{2}+Z_{\mu A e}\right)\right]}\right.$$ $$\left.-\frac{1+\frac{1}{6}G\,Z_{\mu в}}{\left[1+\frac{Z_{\mu A}+Z_{\mu A e}}{Z_{\mu в}+Z_{\mu в e}}\right]\left[1+\frac{1}{3}G_S\left(\frac{Z_{\mu в}}{2}+Z_{\mu в e}\right)\right]}\right\},$$ где G_S - проводимость рассеяния; $Z_{\mu в e}$ - суммарные магнитные сопротивления на выходе систем А и В с включением воздушных зазоров; U - напряжение питания; W_c ,$W_в$ - числа витков измерительной обмотки и обмотки возбуждения. 2. Тяговые усилия $$P_{эр} = \frac{1}{5000}\left[\Phi_{eA}^2\left(\frac{1}{Q_{p1A}}+\frac{1}{Q_{p\,2A}}\right)-\right.$$ $$\left.-\Phi_{eB}^2\left(\frac{1}{Q_{p1в}}+\frac{1}{Q_{p2B}}\right),\right.$$ Φ_{eA} , Φ_{eB} - потоки, замыкающиеся через рабочие зазоры систем А и В; Q_{p1A} , Q_{p1B} - расчетные площади среднего зазора для систем А и В; Q_{p2A}, Q_{p2B} - тоже для наружного кольцевого сердечника.	Общей методики расчета не приводится. Даны расчетные выражения для определения соотношений основных размеров датчиков угловых перемещений. Соблюдение этих соотношений позволяет обеспечить наибольшую чувствительность и высокую линейность выходной характеристики.	1. Магнитная проводимость зазора определяется путем построения картины поля с заменой объемного поля плоскопараллельным. 2. Рассматриваются датчики с конкретными размерами и параметрами обмоток. 3. Основной проблемой считается расчет проводимостей потоков вне ферромагнитных участков и расчет магнитного сопротивления стальных участков магнитопровода. 4. При расчете ферромагнитных участков используются удельные магнитные сопротивления, определенные автором экспериментально на частотах
	Дифференциальный индуктивный датчик угла с Ш - образным магнито-	I. Характеристика «вход-выход»		

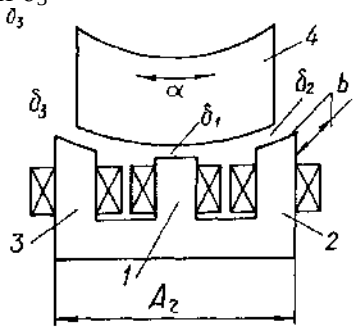
	проводом, радиальной расточкой сердечников I, 2, 3 и якоря 4 и переменной площадью зазоров δ_2 и δ_3  	$E_c = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \frac{W_c}{W_B} U \frac{G_{e1}(G_{e3} - G_{e2})}{G_{e1}(G_{e2} + G_{e3}) + G_S}$, *G* - магнитные проводимости участков магнитопровода. 2. Чувствительность $S = \frac{dE_c}{d\alpha} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \frac{W_c}{W_B} U \frac{1}{G_{e2} + G_{e3}} \frac{d}{d\alpha}(G_{e5} - G_{e1})$. 3. Электромагнитный момент $M_э \approx \frac{F_K}{2} \frac{G_{e1}(G_{e2} + G_{e5})}{G_{e2} + G_{e3} + G_{e1}}$, *Fk* - намагничивающая сила; *G* - магнитные проводимости участков магнитопровода.		500 – 4800 Гц, $Z_{\mu i} = (\rho_{ki} + j\rho_{xi}) \frac{l_i}{Q_{ci}}$ *Qci* - площадь поперечного сечения *li* - того участка, ***l****i* – его длина. 5. К основным характеристикам преобразователя автор относит: магнитные потоки и намагничивающие силы, характеристика "вход-выход", реактивные усилия и моменты.

Таблица П1 (продолжение 31)

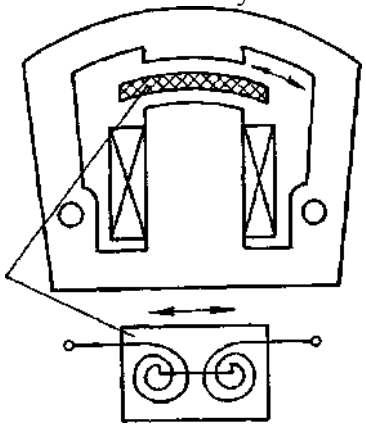
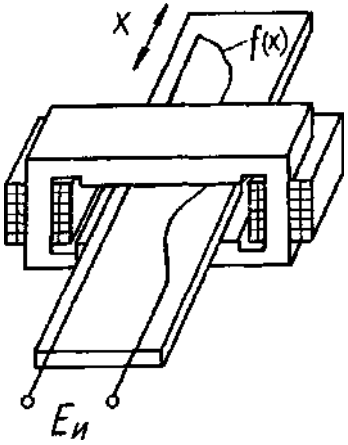
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
	Дифференциальный индукционный датчик угла с постоянной магнитной цепью и подвижными сигнальными катушками 	I. Характеристика "вход-выход" $$E_c = \frac{\omega}{\sqrt{2}} B_e W_c (Q_0' + Q_\Delta' K_{cp}),$$ Размеры и форма площадок *Qo* **и** *QΔ* определяются из геометрических построений и эмпирических расчетных формул. 2. Электромагнитный момент $$M = jU \frac{\omega \frac{W_6 \mu_0}{\delta} (Q_{c3} - Q_{c2})(W_{c3} Q_{c3} - W_{c2} Q_{c2}) B_e z_p}{\omega \frac{\mu_0^2 W_6^2}{\delta} (W_{c3} Q_{c3} - W_{c2} Q_{c2})^2 + \overline{+ \left[R_c + Z_н + j\omega \frac{\mu_0}{\delta} (Q_{c3} W_{c3}^2 + Q_{c2} W_{c2}^2)\right] Z_б}},$$ где ***Rc*** - активное сопротивление катушек. Величины *Qc2* и *Qc3* являются сложными функциями угловых перемещений якоря.		6. При выводе описания метрологических характеристик считаются известными геометрические размеры и магнитные проводимости. Ток и напряжение приняты синусоидальными. 7. При расчете чувствительности $\frac{d}{d\alpha}(G_{e3} - G_{e2})$ определяется экспериментально. 8. Вопросам расчета датчиков с подвижными катушками посвящена также работа [268].

Таблица П1 (продолжение 32)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Конюхов Н.Е. [117,118,139] Графоаналитический метод расчета магнитного поля с использованием магнитных сопротивлений и проводимостей участков цепи. Учет нелинейности намагничивания и гистерезиса, а также картины поля в немагнитных зазорах.	Функциональный преобразователь с профилированной плоской измерительной обмоткой 	I. Статическая характеристика: Выражение в окончательной форме не приводится. Закон изменения искомого профиля обмотки $$f(x)=\frac{-b\pm\sqrt{b^2+4aW(x)/U(x)}}{2a},$$ *U(x)* - закон изменение магнитного поля по координате *x*; *a, b* - постоянные коэффициенты, определяющиеся из двух условий: достижения максимума отклонения между *Φ(y)* и *Ψ(y)* и минимума площади между осью *x* и разностной кривой *Φ(y)-Ψ(y); Φ(y), Ψ(y)* - магнитный поток и потокосцепление; *Q(t)*- сечение поля, перпендикулярное *x*; $$\varphi(x)=W(x+h)-W(x);\ \Psi(x)=\int_x^{x+h}Q(t)dt.$$	1. Расчет рассматривается на примерах. 2. Указывается, что целью расчета является получение максимальной чувствительности преобразователя. 3. Рассчитываются магнитные проводимости зазоров и их оптимальные величины.	1. Исследованы законы изменения магнитного поля, которое принято плоскопараллельным, по координатам X и Y. 2. При расчете магнитных проводимостей и потоков используется метод Б.К.Буля. 3. Кривая намагничивания и петля гистерезиса аппроксимированы полиномами Чебышева $$B=a_1H+a_3H^3+\ldots+a_{2n+1}H^{2n+1}.$$ Практически используется аппроксимация $$B=\beta(H+\alpha_3H^3)\ при\ \alpha<0$$ Указано, что распространенная
	Функциональный трансформаторный преобразователь с подвижным короткозамкнутым витком	I. Статическая характеристика $$\dot{E}_u=2\omega W_u W_в \dot{B}\left(MA_y+\frac{1-ch\dot{l}}{sh\dot{\gamma}l}\right)\frac{\dot{U}_в}{\sqrt{R_в^2+\omega^2W_в^4G_\Sigma^2}},$$ где *Wu, Wв* - числа витков обмоток измерительной и возбуждения: G_Σ - суммарная проводимость магнитной цепи; *Zμ1 , Zμ2* - удельные комплексные сопротивления сердечников *1* и *2; M* – взаимная индуктивность обмоток		

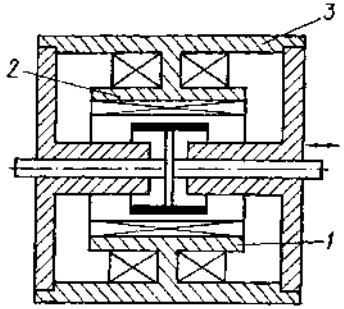
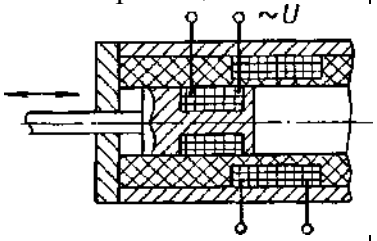
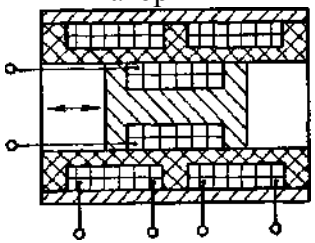
		$M=\frac{\dot{Z}_{\mu 2}}{\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 2}}$; $\dot{A}=\frac{(\dot{Z}_3 G_T+1)g\,sh\gamma l-\gamma\,ch\gamma l G_T}{\gamma M G_1(1-ch\gamma l)+g\,sh\gamma l}$; $\dot{B}=\frac{G_T\gamma\,sh\gamma l}{\dot{A}\gamma\,sh\gamma l\{[\dot{Z}_3+\dot{Z}_{\mu 2}(l_c-l)]G_T+Z_{\mu 2}lG_T+1\}=}$ $=\gamma\,sh\gamma l+GZ_{\mu 2}[(1-ch\gamma l)+M\dot{A}\gamma l]$; g - удельная магнитная проводимость воздушного зазора; GT - проводимость торцевого участка нерабочего зазора; Z_3 – комплексное магнитное сопротивление участка 3; g_s - удельная магнитная проводимость в зазоре между сердечниками *1* и *2* на длине *ls*; $\gamma=\sqrt{(Z_{\mu 1}+Z_{\mu 2})g_s}$. 2. Суммарная температурная погрешность $\gamma_\theta=\left(\frac{g_\delta}{2(R_\theta^2+\omega^2W_\theta^2g_\delta^2)}-1\right)\alpha_\delta\Delta\theta-\frac{R_\theta^2\alpha_R\Delta\theta}{R_\theta^2+\omega^2W_\theta^2g_\delta^2}$; $g\delta$ - проводимость воздушного зазора; a_δ, a_R - температурные коэффициенты; $R_в$ - активное сопротивление обмотки возбуждения; θ - температура; $\Delta\theta$ - изменение температуры. 3. Относительная погрешность от влияния внешнего магнитного поля $\gamma_в=\frac{B_{вн}}{B\delta}$, $B_{вн}$ - индукция внешнего поля; $B\delta$ - индукция в зазоре. 4. Динамическая погрешность $\gamma=\left[\sqrt{\frac{[f'(vt)]^2}{\omega^2[f(vt)]^2}+1}-1\right]100\%$, ω - частота питания; $y = f(vt)$ – скорость перемещения конденсора.		аппроксимация кривой намагничивания гиперболическим синусом недостаточно полно описывает начальный участок кривой намагничивания и не удовлетворяет ограничения, необходимым для получения наилучшего приближения.

Таблица П1 (продолжение 33)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Макаров Т. А. [153] Метод расчета магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода.	Двухобмоточный трансформаторный преобразователь перемещений 	I. Напряжение на измерительной обмотке $E=\frac{\omega}{\sqrt{2}} i_1 W_1 G_x W_{02} hx + \frac{\omega}{\sqrt{2}} i W_1 G_0 W_0$, W_1, Wo, $Wo2$ - число витков обмотки возбуждения, охваченных потоком Φ_0 и удельное число витков измерительной обмотки на единицу сечения окна; h - высота окна обмотки; G - магнитная проводимость. 2. Чувствительность $S=\frac{dE}{dx}=\frac{\omega}{\sqrt{2}} i_1 W_1 G_x W_{02} h$.	1. В качестве исходных данных для расчета принимаются: диапазон перемещений сердечника, диаметр провода, ток обмотки возбуждения, частота питания. 2. Для конкретных схем рассматриваемых преобразователей рассчитываются: выходное напряжение, чувствительность и число витков измерительной обмотки по приводимым в работе упрощенным зависимостям. 3. Расчет основан на значительных упрощениях, без анализа их допустимости и сводится к частному случаю.	1. При расчете магнитных проводимостей зазоров используется метод Б.К.Буля. 2. Автор считает, что решение задачи расчета преобразователя с учетом сложной картины распределения магнитных потоков не может найти непосредственного приложения к инженерной практике. 3. Суммарная проводимость магнитной цепи принята постоянной. Сопротивлением стали пренебрегается.
	Трехобмоточный симметричный трансформаторный 	Выходное напряжение встречно включенных измерительных обмоток $\Delta E = K_0(x_0+\Delta) - K_0(x_0-\Delta)$, $K_1=\frac{\omega}{\sqrt{2}} i_1 W_1 G_x W_{02} h_1$, $K_2=\frac{\omega}{\sqrt{2}} i_1 W_1 G_x W_{03} h_2$, Δ - смещение сердечника.		
Никитин Б.Г. [166] Метод расчета магнитных потоков через магнитные сопротивле-	Преобразователь с подвижной обмоткой	I. Характеристика преобразования $e=2\omega W_u W_в B\left(MAx+\frac{1-ch\dot{\gamma}x}{\dot{\gamma}sh\dot{\gamma}x}\right)\frac{\dot{U}_в}{\sqrt{R_0^2+\omega^2 W^4 G_\Sigma^2}}$ $\dot{\gamma}=\sqrt{g(\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 2})}$; $M=\frac{\dot{Z}_{\mu 2}}{\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 2}}$; $Z\mu 1$, $Z\mu 2$, $Z\mu э$ - удельные комплексные	Методика расчета не рассматривается.	1. Средняя кривая намагничивания аппроксимируется полиномом. Аппроксимация гиперболическим синусом отвергается из-за низкой точно-

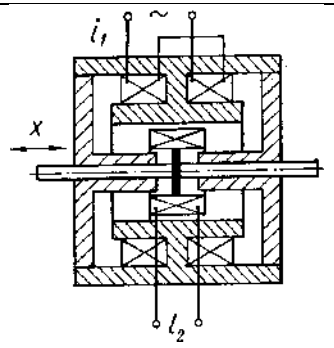
ния и проводимости участков магнитопровода без рассмотрения фактической картины поля.		магнитные сопротивления участков сердечника; W - числа витков обмоток; $$A=\frac{(\dot{Z}_1 G_T+1)g\,sh\dot{\gamma}l-\dot{\gamma}\,ch\dot{\gamma}l\,G_T}{\dot{\gamma}MG_T(1-ch\dot{\gamma}l)+g\,sh\dot{\gamma}l};$$ $$B=\frac{G_T\dot{\gamma}\,sh\dot{\gamma}l}{A\dot{\gamma}\,sh\dot{\gamma}l\{[\dot{Z}_3+\dot{Z}_{\mu 3}(l_3-l)]G_T+\dot{Z}_{\mu 2}lG_T+1\}-}$$ $$-\dot{\gamma}\,sh\dot{\gamma}l+G_T\dot{Z}_{\mu 3}[(1-ch\dot{\gamma}l)+MA\dot{\gamma}l];$$ G_T - проводимость торцевого участка; Z_1, Z_2, Z_3 - комплексные магнитные сопротивления участков цепи; l_i - размеры магнитопровода; G_Σ - суммарная проводимость. Импеданс измерительной обмотки преобразователя $$\dot{Z}_u=W_u^2\left[R_э+j\omega L_э-\frac{(j\omega M_{вэ})^2}{\dot{Z}_в}\right],$$ $Lэ$ - индуктивность экранирующей обмотки: $Rэ$ - активное сопротивление экранирующей обмотки; $Мвэ$ - коэффициент взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и экранирующей обмоткой. 2. Температурная погрешность: Суммарная $$\gamma_{\Delta\theta}=\gamma_{\dot{Z}\mu}+\gamma_\delta+\gamma_{R_в}+\gamma_\varphi;$$ Составляющие $$\dot{\gamma}_{Z\mu}=0$$ $$\gamma_\delta=\left(\frac{1}{g_{\delta p}}-\frac{\omega^2 W_в^4 K g_{\delta p}}{R_в^2+\omega^2 W_в^4 K g_{\delta p}^2}\right)g_{\delta_0}\alpha_\delta\Delta\theta;$$ $$\gamma_{R_в}=-\frac{R_в R_{в0}\alpha_R\,\Delta\theta}{R_в^2+\omega^2 W_в^4 G_\Sigma^2};$$ $$\gamma_\varphi=-\frac{R_в\omega W_в^2 G_\Sigma\alpha_\delta}{\omega^2 W_в^4 G_\Sigma^2+R_в^2}\Delta\theta;$$		сти. 2. Значительное внимание в работе уделяется вопросам исследования остаточного сигнала дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения (сигнала небаланса). Рассматривается влияние этого напряжения на работу схемы. 3. Рассматриваются вопросы коррекции остаточного сигнала, линейности и фазы выходной характеристики. 4. В качестве метрологических требований, к преобразователю, рассматриваются: соответствие реальной функции преобразования заданной, постоянство фазы выходной э.д.с. в диапазоне измерения, минимальное значение остаточной э.д.с., необходимая крутизна преобразования, минимальная температурная погрешность.

Таблица П1 (продолжение 34)

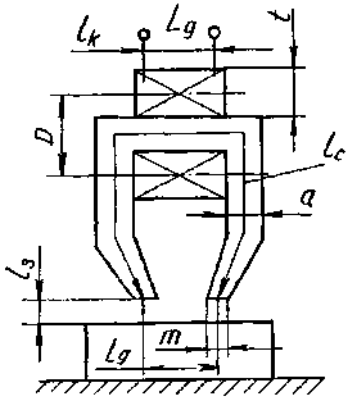
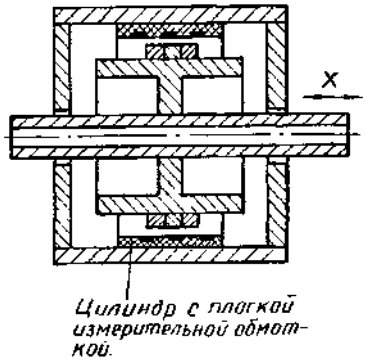
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		g_δ - проводимость воздушного зазора; αr, $\alpha\mu$, $\alpha\delta$ - температурные коэффициенты; $Rв$ - активное сопротивление обмотки возбуждения. 3. Погрешность от колебания частоты питания $$\gamma_\omega = \frac{\Delta\omega/\omega}{1 + \omega^2 W_\delta^4 G_\Sigma^2 / R_\delta^2}$$ 4. Погрешность от внешних полей $$\gamma_B = B_н / B_\delta ,$$ $Bн$ - индукция внешнего поля.		
Ковалевский В.В. [110] Расчет индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником, через магнитное сопротивление магнитопровода. Учтены фактор размагничивания сердечника и поверхностный эффект в детали.	Бесконтактный индуктивный датчик размеров и перемещений 	1. Характеристика преобразования $$L_g = \frac{8\cdot10^{-7}\varepsilon\mu_c W^2 \left(2\sqrt{\frac{n\cdot a}{\pi}} + \frac{0{,}28W}{\varepsilon l_c}\right)^2}{\left[6\sqrt{\frac{na}{\pi}} + \frac{0{,}28W}{\varepsilon l_c} + 9\varepsilon l_c + \frac{2{,}8W}{\varepsilon l_c}\right]\left[1 + \frac{4na}{\pi l_c^2}(\bar{\mu}_\tau - 1)\left(2{,}72 lg \frac{l_c}{2}\sqrt{\frac{\pi}{na}} + 0{,}69\right)\right]} + \frac{4\pi\cdot10^{-7} n W^2}{\frac{l_c}{a\mu_c} + 2lg10^{-6}\sqrt{\frac{f\gamma_g}{\mu_g}} + \frac{l_з}{m}}},$$ $\gamma д$, $\mu д$ - удельная электропроводность и магнитная проницаемость детали, $\varepsilon = lк/lc$, n - толщина сердечника. 2. Чувствительность $$S = \frac{\partial L_g}{\partial l_з} = \frac{4\pi\cdot10^{-10} n W^2}{m\left[\frac{l_c}{a\mu_c} + 2lg10^{-6}\sqrt{\frac{f\gamma_g}{\mu_g}} + \frac{l_з}{m}\right]^2}.$$	Методика расчета не рассматривается. Приведены таблицы метрологических характеристик преобразователей с различными сочетаниями конструктивных параметров. Таблицы получены расчетным путем.	1. Коэффициент размагничивания сердечника принят равным коэффициенту размагничивания эквивалентного цилиндра. 2. Для анализа метрологических характеристик вариантов преобразователя использована ЭВМ. 3. Экспериментально исследована температурная погрешность и влияние свойств детали.

Таблица П1 (продолжение 35)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Нерсесян В.Б. [164] Расчет магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода. Учет распределения поля в зазоре и нелинейности кривой намагничивания.	Функциональный преобразователь малых перемещений трансформаторного типа с плоскими измерительными обмотками  Цилиндр с плоской измерительной обмоткой.	1. Э.д.с. в измерительной обмотке $$E = \frac{\omega W_u F_B a}{G_T\left[(1+a)(\dot{Z}_{\mu 4}+\dot{Z}_{\mu 5})+\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 3}\right]+a G_{ш}\dot{Z}_{\mu ш}} x$$ $$\times\left\{\frac{\dot{K}}{\dot{Z}_{\mu 2}}\left[\dot{\gamma}x+Z_{\mu 2}(G_{lp}-G_T)-\dot{\gamma}\frac{l_p}{2}\right]-G_{lp}\right\},$$ где *Fв* — м.д.с. обмотки возбуждения, *Zμi* - удельные комплексные магнитные сопротивления соответствующих участков цепи; *GT* - проводимость торцевого участка; *Zμш* - магнитное сопротивление шунта, *Rδш1*, *Rδш2* - магнитные сопротивления между магнитопроводом и шунтом; *a* - высота экранирующего витка; ***x*** - входное перемещение, *lp* - рабочая длина; *Glp* - проводимость воздушного зазора $$\dot{\gamma}=\sqrt{g_{ш}(\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 2})}\ .$$ 2. Чувствительность $$S=\frac{dE_a}{dx}=-j\frac{\omega W_u F_B \dot{K}\dot{\gamma}^2}{\dot{Z}_{\mu 2}\left[\frac{G_T}{a}(\dot{Z}_{\mu 1}+\dot{Z}_{\mu 3}+\dot{Z}_{\mu 4}+\dot{Z}_{\mu 5})+\right.}$$ $$\left.+G_T(\dot{Z}_{\mu 4}+\dot{Z}_{\mu 5})+G_{ш}\cdot\dot{Z}_{\mu ш}\right]}.$$ 3. Погрешность старения $$U=U_0(1+C\Delta\tau).$$ *Uo* - величина э.д.с. вновь изготовленного преобразователя; *C* - коэффициент старения; $\Delta\tau$ - полное время существования преобразователя.	В законченном виде методика расчета не сформулирована. Приводится ряд рекомендаций для соотношений конструктивных параметров преобразователя.	1. Поле в зазоре учитывается построением геометрической картины поля. 2. Кривая намагничивания аппроксимируется гиперболическим синусом. 3. В работе приведены сведения по исследованиям гармонического состава остаточного сигнала и режимов работы преобразователя. 4. Рассмотрены погрешности от неточности изготовления и сборки отдельных конструктивных размеров рассматриваемого преобразователя и неточности нанесения измерительного профилированного контура. 5. Рассмотрены погрешности от нестабильности ча-

		4. Температурные погрешности $\gamma_{R_\delta} = -\frac{R_\delta R_{\delta 0} \alpha_R \Delta t}{R_\delta^2 + \omega^2 W_\delta^2 g_{\delta w1}^2}$, $\gamma_g = \left(1 - \frac{g_{\delta w1}^2 \omega^2 W_\delta^4}{R_\delta^2 + g_{\delta w1}^2 \omega^2 W_\delta^4}\right) \alpha_g \Delta t$, $\gamma_{Z_\mu} = \frac{K_3 Z_{\mu}^2 - K_4 Z_{\mu}^3}{(2K_3 - 3K_4 Z_\mu)(K_1 Z_\mu + K_2)} \alpha_\mu \Delta t$, $g_w = \frac{1}{R_{\delta w1}} + \frac{1}{R_{\delta w2}} + \frac{1}{\dot{Z}_{\mu w}}$, $\dot{K} = \frac{-\dot{Z}_{\mu 2}}{\dot{Z}_{\mu 1} - \dot{Z}_{\mu 2}}$, $K_1 = j\omega W_u U_\delta W [g_w x +$ $+ \frac{1}{2}(G_{lp} + G_T) - g_w l_p + G_{lp}](-3G_{lp} - 3G_T - 2G_w) l_p$, $K_2 = -j\omega W_u U_\delta W_\delta [g_w x + \frac{1}{2}(G_{lp} + G_T) - g_w l_p + G_{lp}]$, $K_3 = 4G_{lp} + 4G_w + 2G_T$, $K_4 = 4G_T (G_T + G_{lp}) l_p - 4(G_{lp} + G_T + G_w) g_w l_p^2 +$ $+ 2G_T l_p (3G l_p + 3G_T + 2G_w)$, *Gш10, Rв0, Zμ0* - значения перечисленных величин при номинальной температуре; *αi* - температурные коэффициенты. 5. Погрешность от внешнего магнитного поля $\gamma_B = \frac{B_{\delta H}}{B_{\delta w}}$, 6. Динамическая погрешность: $\gamma = \left[\sqrt{\frac{[f'(vt)]^2}{\omega^2 [f(vt)]^2} + 1} - 1\right] \cdot 100\% \cdot$		стоты и амплитуды напряжения питания. 6. В качестве целей исследования автор называет выбор оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих максимальную точность и чувствительность преобразователя.

Таблица П1 (продолжение 36)

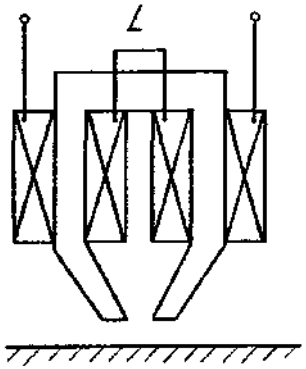
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Савич А.И. [203] Метод расчета магнитных сопротивлений и проводимостей с расчетом поля в зазоре по Ротерсу Г.	Бесконтактный индуктивный датчик размеров и перемещений 	I. Индуктивность преобразователя $$L = \frac{W^2 (R_{\Sigma s} + R_{\Sigma p})}{R_{\Sigma s} R_{\Sigma p}},$$ $R_{\Sigma s} = \frac{1}{G_{\Sigma s}}$ - полное магнитное сопротивление воздушного зазора; $R\Sigma p = 1/G\Sigma p$ - полное магнитное сопротивление потоков рассеяния, $$G_{\Sigma s} = \frac{1}{2}\left[G_1 + G_3 + G_{10} + 2(G_2 + 2G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + G_{11})\right],$$ $$G_{\Sigma p} = \frac{1}{2}\left[G_{12} + G_{13} + 2(G_{14} + G_{15} + G_{16} + G_{17})\right],$$ $\hat{Gi}$ - магнитные проводимости геометрических фигур, на которые условно разбивается поле. 2. Погрешность измерения от перекоса измерительной поверхности относительно полюсов $$\Delta S = \frac{W^2}{k R_{\Sigma s}} \left(\frac{R_{\Sigma s}}{R'_{\Sigma s}} - 1\right),$$ $$R'_{\Sigma s} = \frac{G_л + G_п}{G_л G_п}$$ - полное магнитное сопротивление зазора при наклоне поверхности; $G_л$, $G_п$ - проводимости левого и правого полюсов.	Методика расчета преобразователя не рассматривается.	1. Особенности магнитного потока ферромагнитных участков не учитываются. 2. При оценке погрешности от перекоса измерительной поверхности оценивается изменение суммарной проводимости зазоров расчетом поля в зазоре по методу "вероятных потоков" Г. Ротерса.

Таблица П1 (продолжение 37)

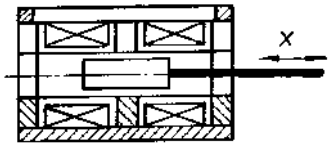
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Семерджиев А.Х. [211] Метод расчета магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости участков цепи. Расчет поля в зазорах по методу "вероятных потоков" Г. Ротерса.	Соленоидный индуктивный датчик 	Полное сопротивление катушки датчика $$Z = R_a + \frac{\omega W^2 X_M}{Z_M^2} + j\frac{\omega W^2 R_M}{Z_M^2},$$ где $Z_M^2 = R_M^2 + X_M^2$, Z_M - полное магнитное сопротивление $$R_M = \frac{1}{\mu_0\left(\frac{\pi l_y}{\ln\frac{d_y}{d_3}} + 2{,}35d_3 - 0{,}7d_4\right)} + \frac{\ln\frac{d_5}{d_3}}{\pi\mu_0(x - l_{21} - \frac{l_{11}}{2})} + Q_R\left(\frac{4\pi y}{d_6^2 - d_5^2} + \frac{\ln\frac{d_5}{d_4}}{2\pi l_{11}} + \frac{4\pi x}{d_3^2 - d_1^2}\right),$$ $$X_M = Q_X\left(\frac{4\pi y}{d_6^2 - d_5^2} + \frac{\ln(d_5/d_4)}{2\pi l_{11}} + \frac{4\pi x}{d_8^2 - d_1^2}\right),$$ цепи, y - длина катушки; l, d - размеры.	Методика расчета преобразователя не рас-	1. Указывается на влияние на характеристику датчика взаимной индуктивности между его обмотками. 2. Магнитное сопротивление магнитопровода определяется через удельные активные и реактивные Qr и Qx сопротивления материала.

Таблица П1 (продолжение 38)

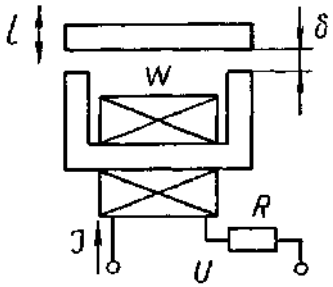
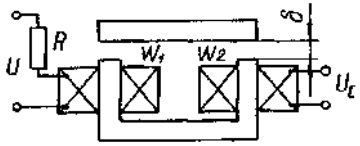
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Срибнер Л.А. [223] Метод расчета магнитных сопротивлений и проводимостей участков магнитной цепи преобразователя с оценкой поля в зазоре методами построения картины поля.	Дроссельный преобразователь  Трансформаторный преобразователь  	1. Индуктивность преобразователя $L = \frac{W^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 S_{экв}} + \frac{l_{ср}}{\mu S}}$, 2. Полное сопротивление обмотки преобразователя $Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2_{экв}}$. 3. Чувствительность преобразователя $S = \frac{J}{l}$, *J* - выходной сигнал, *l* - перемещение. 4. Относительная погрешность трансформаторного преобразователя: - недифференциального $\left(\frac{\Delta U_c}{U_c}\right) = k\frac{\Delta U}{U}$ *U* – напряжение питания, *к* - коэффициент трансформации, - дифференциального $\left(\frac{\Delta U_c}{U_c}\right) = (k_1 - k_2)\frac{\Delta U}{U}$.	Рассматривается проверочный расчет преобразователя. 1. Задается эскиз магнитопровода. 2. Цепь разбивается на участки и для них строятся кривые намагничивания. 3. Строится кривая намагничивания магнитопровода. 4. Приближенно определяется магнитное сопротивление магнитопровода. 5. Рассчитывается катушка исходя из параметров схемы включения. 6. Уточняется величина среднего сопротивления катушки преобразователя. 7. Расчет повторяют для других положений якоря и строят характеристику преобразователя по измеряемому перемещению.	1. Рассматриваются преимущества дифференциального преобразователя по сравнению с одинарным. 2. Для расчета магнитной проводимости зазоров рекомендуются методы: вероятных путей потока (по Б.К.Буль), графическое построение картины поля, моделирование поля электри-ческими методами. 3. Для ферромагнитных участков рекомендуется учитывать поверхностный эффект по формулам $S_t = 2(a+b)h$, *2(a+b)* - периметр сечения магнитопровода, $h = 50\sqrt{\frac{\rho_\mu}{\mu_c f}}$.

Таблица П1 (продолжение 39)

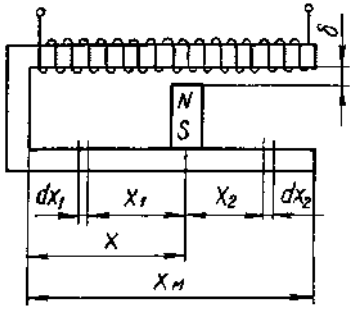
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Богданова Н.А. [36] Метод расчета магнитных потоков в магнитной цепи с распределенными электромагнитными параметрами.	Преобразователь перемещений с постоянными магнитами 	I. Статическая характеристика $$E(x)=\frac{2J_x K_x F_M g X_M}{M}\left[\beta(K_0+K_T)ch\beta+(\beta^2+K_0K_T)sh\beta\right]x_0,$$ где *Кх* - коэффициент Холла; *Jx* - ток питания Холла; *Fм* - наибольшая м.д.с. постоянного магнита; g - погонное значение магнитной проводимости рабочего воздушного зазора между длинными стержнями магнитопровода; *Хм* - длина магнитной линии; β - коэффициент распространения магнитного потока вдоль магнитопровода $$\beta=\gamma X_M,\ \gamma=\sqrt{2r_\mu g},\ x_0=X/X_M$$ - координата положения постоянного магнита; $r\mu$ - погонное значение магнитного сопротивления стержней; $$K_o=Z_{\mu o}gX_M,\ K_T=Z_{\mu T}gX_M,$$ $Z\mu o$ - магнитное сопротивление основания магнитопровода; $Z\mu T$- магнитное сопротивление торца магнитопровода.	Исходные данные для расчета: наибольшее значение э.д.с. на выходе преобразователя, диапазон перемещений магнита, внешний диаметр магнитопровода, параметры магнита, кривые намагничивания, допустимая нелинейность характеристики. Последовательность расчета: 1. Производится геометрический расчет магнитопровода, исходя из рекомендуемых соотношений его размеров. 2. Определяются размеры магнита. 3. Определяется число витков измерительной обмотки.	1. При анализе и расчете магнитной цепи с распределенными параметрами используется методика М.Ф. Зарипова. 2. Все расчетные зависимости даются для датчика перемещений с постоянными магнитами и элементами Холла, расчетная схема которого в работе не приводится. 3. При определении степени нелинейности решение уравнения $$\frac{dE}{dX_0}=0$$ не приводится. 4. Предполагается, что материал магнитопровода далек от насыщения и нелинейность магнитных характеристик не учитывается.

Таблица П1 (продолжение 40)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		2. Степень нелинейности $\varepsilon = 0{,}5\left[E^*(x_{ok}) - \frac{x_{ok}}{x_{om}}\right]\cdot 100\%,$ $E^*(x_{ok}) = \frac{K_{\mu\delta}\left[2\beta K ch\beta + (\beta^2 + K^2) sh\beta\right]}{M_1} +$ $+\beta\left[\beta K sh\beta + \beta^2 sh^2 0{,}5\beta + K^2 ch^2 0{,}5\beta\right],$ $x_{om} = \frac{\beta^2 + K_0 K_T + K_0 - K_T}{2(\beta^2 - K_0 K_T)},\ x_{ok} = \frac{x_k}{x_m}$ - относительная координата наибольшего отклонения статической характеристики от аппроксимирующей прямой $M = K_{\mu\delta}\left[\beta(K_0 + K_T) ch\beta + (\beta^2 + K_0 K_T) sh\beta\right] +$ $+\beta(K_0 ch\beta x_0 + \beta sh\beta x_0)\left[\beta sh\beta(1 - x_0) +$ $+ K_T ch\beta(1 - x_0)\right],\ K_{\mu\delta} = K_\delta + K_\mu = K_{\mu 0} g X_M + R_M g X_M$ $M_1 = K_{\mu\delta}\left[(\beta^2 + K^2) sh\beta + 2\beta K ch\beta\right] + \beta\left[\beta K sh\beta +\right.$ $\left.+\beta^2 sh\beta x_0 sh\beta(1 - x_0) + K^2 ch\beta x_0 ch\beta(1 - x_0)\right],$ $K = \beta$ 3. Погрешности преобразователя: - Погрешность от неточности воспроизведения закона распределения удельной магнитной проводимости $\gamma_g\% = \pm 10\frac{d_1 d}{d_1^2 - d^2}\sqrt{K_N^5 N^5}\cdot 100\%$ *d1* , *d* - размеры: *N* - номер класса обработки, *KN* - коэффициент пропорциональности.		5. Поле в зазоре принято плоскопараллельным. 6. Получены сложные выражения для распределения магнитных потоков и магнитных напряжений вдоль магнитопровода. Указывается, что анализ этих выражений возможен только с помощью ЭВМ. 7. В работе рассматривается также теория датчика скорости. 8. Вопросы расчета магнитных сопротивлений и проводимостей участков магнитопровода не рассматриваются. 9. Указывается, что точное определение закона распределения параметров у преобразователя невозможно.

Таблица П1 (продолжение 41)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		- Неточность сборки $\gamma_\alpha\,\% = -\dfrac{l_м\,\alpha}{\delta + \dfrac{n H_c B^{(n-1)}(d_1-d)}{2B_r^n}} \cdot 100\%$ α - угол перекоса, $1 \le n \le \infty$ - Температурная погрешность от нестабильности магнитного сопротивления магнитопровода $\gamma_{rм\theta}\,\% = -\dfrac{K^3 \beta \alpha_{мст} \Delta\theta}{K_\mu \delta (2K + K^2 + \beta^2) + K(\beta^2 + K)}$, - от изменения сопротивления магнита $\gamma_{RM\theta}\,\% = -\dfrac{K_\mu \alpha_м \Delta\theta}{K_\mu \delta} \cdot 100\%$, - от изменения размеров $\gamma_{0г}\,\% = \sqrt{\alpha_{ст}^2 + \dfrac{\alpha l_м^2}{(K_\mu \delta - 2K_м)^2}} \cdot \Delta\theta \cdot 100\,\%$ - Погрешность от внешнего поля $\gamma_{вв}\,\% = \dfrac{\omega B_{вн} d\,[2\delta B_г + H_c \mu_0 (d_1 - d)]}{4\mu_0 B_г H_c (d_1 - d) l_м} \cdot 100\%$		
Фикс-Марголина И.Г. [252] Метод расчета магнитных потоков через магнитные сопротивления и прово-	Датчик линейных перемещений с С-образным магнитопроводом и подвижной сосредоточенной измерительной обмоткой	1. Статическая характеристика датчика $E_x = -j\omega W_и F_б g X_м \{[0{,}61 + 0{,}128\beta_н^2) + (0{,}015 - 0{,}0064\beta_н^2)(5 - \beta_g^2)] X_0 + [(0{,}09 + 0{,}048\beta_н^2) - (0{,}003 - 0{,}002\beta_н^2)(5 - \beta_g^2)^2] X_0^3\}$, $W_И$ - число витков измерительной обмотки, g - удельная магнитная проводимость рабочего воздушного зазора; $X_М$ - максимальная длина	Исходные данные для расчета: ток (или напряжение) возбуждения, предел перемещений, минимальная чувствительность, допустимая нелинейность, частота питания, диаметр провода измерительной обмотки, магнитные характеристики мате-	1. Магнитное сопротивление магнитопровода не учитывается. 2. Потоки выпучивания на торце магнитопровода не учитываются. 3. Учет нелинейно-

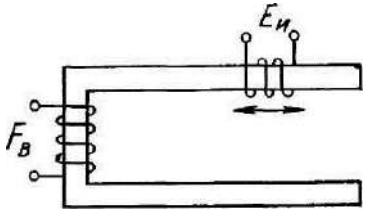
димости участков магнитной цепи. Учет нелинейности намагничивания. Решение нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих магнитную цепь с распределенными параметрами, методами Рунге-Кутта и квазилинеаризации.		магнитопровода; *Fв* - намагничивающая сила возбуждения; $\beta=\sqrt{2g\gamma_\mu}\,x_м$, $\gamma_\mu=\frac{Q_\mu}{S}$, $\beta_н=\gamma_н x_м$, $\gamma=\sqrt{2ag/s}$. 2. Степень нелинейности характеристики $\varepsilon\%=50\frac{(0{,}001-0{,}000077\beta_н^2)(5-\beta_g^2)+(0{,}035-0{,}0185\beta_н^2)}{(0{,}7-0{,}08\beta_н^2)+(0{,}012-0{,}0044\beta_н^2)(5-\beta_н^2)^2}$. 3. Чувствительность датчика к перемещению $S_x=\omega W_и g F_в\{[(0{,}61-0{,}128\beta_н^2)+(0{,}015+0{,}0064\beta_н^2)\times(5-\beta_g^2)^2+[(0{,}27+0{,}144\beta_н^2)-(0{,}009-0{,}002\beta_н^2)\times(5-\beta_g^2)^2]x_0^2\}$, где $x_0=x/x_м$ – относительная координата рассматриваемого сечения; *S* - сечение стали магнитопровода. 4. Погрешность от нелинейности статической характеристики $\gamma_\varepsilon=\frac{[(0{,}09+0{,}048\beta_н^2)-(0{,}003-0{,}002\beta_н^2)(5-\beta_g^2)^2]x_0(x_0^2-1)+[(0{,}0173+0{,}009\beta_н^2)-(0{,}0006-0{,}00038\beta_н^2)(5-\beta_g^2)^2]}{(0{,}7-0{,}08\beta_н^2)+(0{,}012-0{,}0044\beta_н^2)(5-\beta_g^2)^2}$.	риала магнитопровода. В процессе расчета определяются размеры магнитопровода и числа витков обмотки. 1. Величина воздушного зазора определяется с использованием экспериментальной кривой. 2. Производится геометрический расчет магнитопровода. 3. Определяется проводимость зазора. 4. Определяется намагничивающая сила обмотки возбуждения. 5. Определяются параметры обмоток.	сти намагничивания производится путем аппроксимации зависимости удельного магнитного сопротивления стали от индукции $Q_\mu(B)$ выражением $Q_\mu=\alpha_1+\beta_1 H+\frac{\gamma_1}{H}$. 4. Потоки выпучивания вблизи сосредоточенных обмоток не учитываются. 5. Намагничивающая сила принимается синусоидальной. 6. Анализ показывает, что неучет нелинейности $Q\mu(B)$ дает погрешность расчета магнитного потока в худшем случае не более 25 %. 7. Выведены рекомендации по соотношениям геометрических размеров и параметров магнитопровода и преобразователя в целом.

Таблица П1 (продолжение 42)

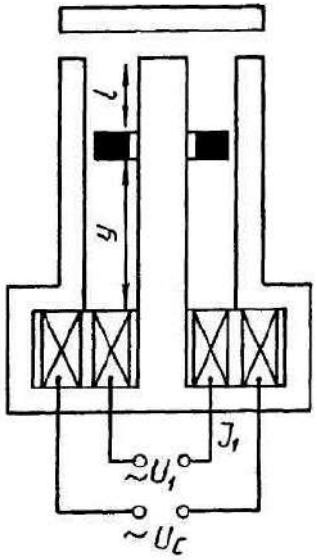
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Гераськов В.Л. [57] Расчет магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода. Использование метода суперпозиций. Методы теории автоматического управления при исследовании динамики подвески.	Преобразователь перемещений на принципе индукционной подвески 	1. Полное сопротивление обмотки возбуждения $$Z_1 = z_1 + j\omega\left[L_{1S} + W_1^2 \frac{K_3 l^{\dot\gamma l_c} - K_4 l^{-\dot\gamma l_c}}{Z_{\mu T}\,\dot Z}\right] + \frac{\omega W_1 W_2 \dfrac{K_3 l^{\dot\gamma(l_c-y)} - K_4 l^{-\dot\gamma(l_c+y)}}{\dot Z}}{z_2 + j\omega\left\{L_{2S} + W_2^2 \dfrac{g}{2\delta}\dfrac{(K_1 l^{\dot\gamma y} - K_2 l^{-\dot\gamma y})(K_3 l^{\dot\gamma(l_c-y)} - K_4 l^{-\dot\gamma(l_c-y)})}{\dot Z}\right\}}$$ $$\dot Z = K_1 K_2 l^{\dot\gamma l_c} - K_2 K_4 l^{-\dot\gamma l_c},$$ lc - длина стержней; $W1, W2$ - числа витков; $L1S$, $L2S$ - индуктивности рассеяния обмотки возбуждения и экрана; $Z\mu$ - комплексное магнитное сопротивление на единицу длины магнитопровода; g - удельная магнитная проводимость воздушного зазора; $$\dot\gamma = \sqrt{\dot Z_\mu g};\quad K_1 = 1 + \frac{\dot\gamma}{\dot Z_{\mu T} g};\quad K_2 = 1 - \frac{\dot\gamma}{\dot Z_{\mu T} g};$$ $$K_3 = 1 + \frac{\dot\gamma}{g} G_s;\quad K_4 = 1 - \frac{\dot\gamma}{g} G_s;$$ $\dot Z_{\mu T}$ - магнитное сопротивление основания магнитопровода; G_s – суммарная магнитная проводимость якоря и воздушных зазоров между якорем и торцами стержней.	Общая методика расчета не рассматривается. Приводится ряд рекомендаций по выбору параметров: 1. Диапазон измеряемых перемещений выбирать таким образом, чтобы экран перемещался в средней части рабочего воздушного зазора. 2. Если начальное положение $$y_o \approx (0{,}65 - 0{,}75) l_c,$$ амплитуда перемещения (0,3-0,4)l_C, то нелинейность выходных характеристик ε = (2,8 - 4,1) %. 3. В режиме заданного тока наблюдается наименьшее влияние внешних факторов.	1. Преобразователи на основе индукционной подвески рассмотрены также в [259, 260, 261, 262, 263]. 2. Для расчета отдельных параметров цепи использована ЭВМ. 3. Магнитная цепь подвески рассматривается как цепь с распределенными параметрами. Для такой цепи получено математическое описание. 4. Исследованы картины магнитного поля в воздушном зазоре путем моделирования на электропроводной бумаге. 5. Исследованы динамические свойства индукционной подвески.

Таблица П1 (продолжение 43)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		2. Выходная характеристика: - в режиме $J_1=const$ $U_1 = J_1 \dot{Z}(y)$, - в режиме $U_1=const$ $J_1 = U_1/\dot{Z}_1(y)$. 3. Э.Д.С. сигнальной обмотки: $U_c \approx U_1 W_c / W_1$. 4. Чувствительность $S_y = \frac{dJ_1}{dy} = \frac{U_1}{\omega W_1^2 g y^2}$. 5. Нелинейность выходной характеристики преобразователя в режиме заданного тока $\varepsilon = \frac{\sqrt{R_1}}{2\sqrt{2}}\left[\frac{(\sqrt{R_1^2 + a^2 y_{max}^2} + R_1)^{1/2}}{R_1^2 + a^2 y_{max}^2 - R_1} - \frac{(\sqrt{R_1^2 + a^2 y_{max}^2} - R_1)^{1/2}}{a y_{max}}\right]$, y_{max} - максимальное значение измеряемого перемещения.		6. Исследован вопрос оптимизации геометрических размеров экрана с целью получения максимальной удельной электродинамической силы. 7. Напряжения и токи приняты синусоидальными. 8. Рассмотрен пример графоаналитического расчета выходной характеристики дифференциального преобразователя. 9. Гистерезисом и нелинейностью кривой намагничивания пренебрегается.

Таблица П1 (продолжение 44)

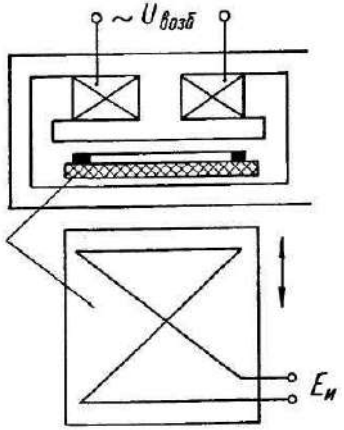
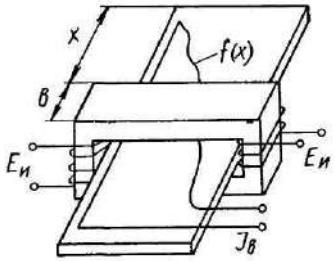
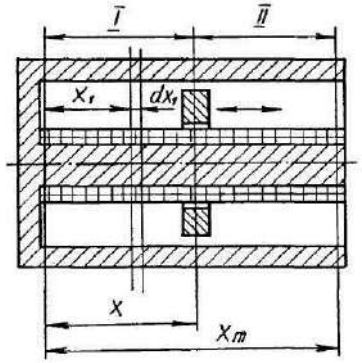
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Кирюшин Г.Н. [106] Расчет магнитных потоков через магнитные сопротивления и проводимости. Использование элементов теории поля.	Индуктивный преобразователь перемещения 	Выходная э.д.с. $E_и \approx \frac{\mu_0 \mu_г E R_э W_в S_c S_p(x) l^{-\alpha t}}{4 S_0 (L R_э - M R_д)(l_{c1} + \mu_г K_1^{\Delta} \delta_0)}$, *δo* - путь потока в воздухе; *lc* - путь потока в стали; *sc* - сечение магнитопровода; *μr* - относительная магнитная проницаемость, $K_1^{\Delta} = \frac{S_c}{S_{01}}$ - отношение потока по стали к соответствующей площади потока по воздуху; *L* - индуктивность коллекторной обмотки; *Rд* – динамическое сопротивление стабилитрона; *R*э - резистор в цепи эмиттера; *E* - напряжение стабилизации стабилитронов; *Wв* - число витков обмотки возбуждения.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются.	1. Исследуются преобразователи с совмещенными функциями, у которых индуктивный преобразователь выполняет роль элемента положительной обратной связи генератора релаксационных колебаний. 2. Вопросы расчета магнитного сопротивления и магнитных проводимостей зазоров не рассматриваются. 3. Метрологические характеристики не определяются и не исследуются.
Зарипов М.Ф. Ураксеев М.М. [85] Метод расчета магнитного потока через сопротивления и	Функциональный преобразователь с профилированной плоской обмоткой	I. Статическая характеристика $\dot{E}_и = -j\omega \frac{\dot{J}_в W_в W_и g X_м 2 sh\beta L^*}{\beta ch\beta}$, *L** - относительная ширина контура измеритель-ной обмотки; *L*=L/LM, g* - магнитная проводи-мость между стержнями; *XM* - максимальная координата перемещения,	Указывается, что единая методика расчета преобразователей разных типов невозможна. Для преобразователя с профилированной обмоткой исследуются чувствительность $S = f(h)$	1. Исследованы также преобразователь с плоской обмоткой и подвижным экраном и многооборотный преобразователь угловых перемещений.

Таблица П1 (продолжение 45)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
проводимости участков цепи.		$\dot{\beta} = \sqrt{2\dot{z}_\mu g X_м}$, $\dot{z}_\mu$ - магнитное сопротивление стержней. 2. Погрешности: - от поперечного горизонтального люфта измерительной обмотки $\gamma_{\Delta l} = \frac{sh\beta(L^* + \frac{\Delta l}{L_м}) - sh\beta L^*}{sh\beta} \cdot 100\%$, - от механического гистерезиса $\gamma_{мех.2} = \pm \frac{\Delta l_2}{X_м}$, $\Delta l2$ - максимальное продольное отставание подвижной обмотки от объекта. - от магнитного гистерезиса $\gamma_{маг.г.} = \frac{H_{ост} R_{ист} G\delta max}{H_м}$, *НМ, Ност* - максимальное и остаточное значение напряженности в магнитопроводе; *Rμст* - магнитное сопротивление стали на пути рабочего потока; *Gδmax* - магнитная проводимость воздушного зазора на пути потока, - от колебания тока возбуждения $\gamma_{Jв} = \frac{\Delta J_в}{J_{вм}} f(X_*)$, - от колебания частоты питания $\gamma_\omega = \frac{1}{E_{им}} \cdot \frac{\partial E_и}{\partial \omega} \cdot \Delta\omega$, - от внешнего магнитного поля	и степень отклонения от воспроизводимой характеристики $\varepsilon=f(h)$ и находятся оптимальные соотношения размеров сердечника, которые и рекомендуется выдерживать. Для расчета задаются частично размеры магнитопровода, напряжение и частота питания, допустимая степень отклонения от воспроизводимой функции, чувствительность, характеристика магнитного материала и пр. Расчету подлежат недостающие размеры магнитопровода и числа обмоток. Конкретных выражений для расчета этих параметров не приводится.	2. Приводится обширная классификация погрешностей и их обсуждение. Называются следующие составляющие погрешности: степень отклонения от воспроизводимой функции, реактивная составляющая магнитного сопротивления, высшие гармонические составляющие, непостоянство погонных значений распределенных магнитных параметров, непостоянство погонных значений электрических параметров, неточность функционального распределения параметров, люфт между неподвижными и подвижными частями конструкции, механический гистере-

		$\gamma_{\phi} = \frac{B_{вн}\delta\left[\int_0^{x_m} f(x)dx - \int_x^{x+в} f(x)dx\right]\cdot 100\%}{\mu J_в W_в \left[\int_x^{x+в} f(x)dx\right]_{max}}$ - от внешней ферромагнитной массы $\gamma_{вн.м.} = \frac{\delta\left[\int_0^{x_м} f(x)dx - \int_x^{x+в} f(x)dx\right]^2\cdot 100\%}{(h_0+2h_s)(x_м-в)h_m\left[\int_x^{x+в} f(x)dx\right]_{max}}$		зис, магнитный гистерезис, колебание параметров тока возбуждения, колебания температуры, внешние поля, внешние ферромагнитные массы, непостоянство нагрузки на выходе преобразователя, динамическая погрешность.

Таблица П1 (продолжение 46)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
Черных В.В. [261] Описание магнитных потоков и напряжений в магнитной цепи дифференциальными уравнениями второго порядка с учетом распределенной м.д.с. и граничных условий и решение этих уравнений.	Индуктивный первичный преобразователь перемещений (ИППП) с распределенными электромагнитными параметрами и переменным сопротивлением магнитопровода магнитному потоку 	I. Статическая характеристика $L = W^2 G \frac{1}{\beta^2}\left\{1 - \frac{sh\beta + \beta K_\delta sh\beta(1-x_0)shx}{\beta[ch\beta + \beta K_\delta ch\beta(1-x_0)sh\beta x_0]}\right\}$ $\dot{Z}_m = \dot{z}_\mu X$, $\dot{z}_\mu$ - погонное магнитное сопротивление; X - координата подвижной части; Zm - магнитное сопротивление на пути рабочего магнитного потока; g - погонное значение магнитной проводимости; $G\partial$ - полная магнитная проводимость подвижного сердечника; $Z\mu T$ - магнитное сопротивление торца магнитопровода; $W = WpyXм$ - число витков распределенной обмотки; $G = gXm$ магнитная проводимость воздушного зазора между цилиндрами; $K\delta = G\delta/G$ - отношение магнитной проводимости подвижной части к магнитной проводимости между цилиндрами магнитопровода $x_0 = x/x_м$, $\dot{\gamma} = \pm\sqrt{2\gamma_м g}$, $\beta = \dot{\gamma} X_м$ 2. Степень нелинейности $\varepsilon_1\% = 50\left[\frac{(0{,}615 + K_\delta X_{ок}^2)^{\frac{1}{2}}(1 + 0{,}5\beta^2 + \beta^2 K_\delta X_{ок})^{-\frac{1}{2}}}{(0{,}5 + K_\delta)^{\frac{1}{2}}(1 + 0{,}5\beta^2 + \beta^2 K_\delta)^{-\frac{1}{2}}} - \frac{-0{,}71(1+0{,}5\beta^2)^{-\frac{1}{2}}}{-0{,}71(1+0{,}5\beta^2)^{-\frac{1}{2}}} - X_{ок}\right]$, $Xок = Xк/XM$ - относительная координа-	Задаются: величина чувствительности Scp, степень невоспроизведения статической характеристики ε, диапазон перемещений подвижной части. 1. Основные поперечные размеры находятся по рекомендуемым соотношениям. 2. Определяются удельные магнитные сопротивления и проводимости по найденным поперечным размерам без учета реальной картины поля в зазоре. 3. Рассчитываются параметры обмотки с использованием заданной величины чувствительности. 4. Геометрическим расчетом определяется величина зазора. 5. Определяются предельные длиновые размеры магнитопровода. 6. Определяется величина тока в обмотке из условия обеспечения заданной индукции.	1. Получены оптимальные соотношения продольных и поперечных размеров магнитопровода, исходя из условия обеспечения максимальной чувствительности. 2. Зависимость степени невоспроизведения статической характеристики от параметров магнитной цепи описывается выражением $2\gamma_\mu g X_м^2 = \frac{1{,}85\varepsilon}{0{,}04 - 2{,}5\varepsilon}$ 3. Указывается, что при расчете магнитной цепи расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 15 %, расчет статической характеристики и температурной погрешности дают расхождение с экспери-

		та наибольшей нелинейности, должна находиться из решения уравнения $$\frac{d\varepsilon}{dx}=0$$ 3. Чувствительность $$S_1=\frac{dL}{dx}=\frac{W^2G}{\beta^2}\left\{\frac{\beta K_\delta sh^2\beta X_0+\beta^2K_\delta^2sh^2\beta X_0}{[ch\beta+\beta K_\delta Sh\beta X_0 ch\beta(1-X_0)]^2}\right\}$$		ментом в 20 %. 4. Пренебрегается нелинейностью характеристик магнитного сопротивления материала магнитопровода, потоками выпучивания на концах магнитной линии.

Таблица П1 (продолжение 47)

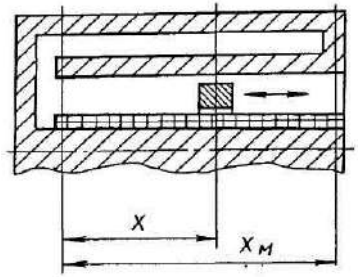
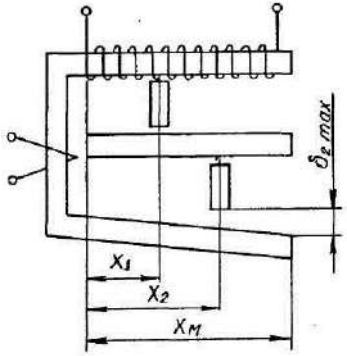
Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		4. Приведенная погрешность из-за нелинейности характеристики $\gamma_{\varepsilon 1}\% = 50\left[\frac{sh^2\beta X_{0к}(ch\beta+\beta K_\delta sh\beta)}{sh^2\beta(ch\beta+\beta K_\delta sh\beta X_{0к} ch\beta X_{0к})} - X_{0к}\right]$.		Поле в области зазора принято плоскопараллельным, а материал магнитопровода однородным. 5. Анализ выражений для магнитных потоков проведен на ЭВМ численным методом. На ЭВМ рассчитаны кривые распределения потока в сечениях магнитопровода. 6. Указывается, что максимальное расхождение результатов расчета магнитных потоков и их экспериментального определения не превышает 10 %. 7. В качестве основных характеристик преобразователя называются: статическая характеристика, степень воспроизведения статической
	ИППП с распределенными электромагнитными параметрами с постоянным сопротивлением рабочему магнитному потоку  	I. Статическая характеристика $L' = \frac{2W^2G}{\beta^2}\left\{1 - \frac{X_0(ch\beta - ch\beta X_0) + 2(sh\beta/\beta - 1) + \beta sh\beta + \right.$ $+ \frac{3ch\beta + ch\beta X_0 + ch\beta(1-X_0) + K_\delta[sh\beta X_0 ch\beta(1-X_0) +}{+ 3\beta sh\beta +}$ $+ \frac{\frac{2}{\beta} sh\beta X_0 sh\beta(1-X_0) + 3ch\beta X_0 sh(1-X_0) +}{+ K_\delta[sh\beta + 3\beta ch\beta X_0 ch\beta(1-}$ $\left. \frac{+\beta ch\beta X_0 ch\beta(1-X_0)]}{-X_0)]}\right\}$. 2. Чувствительность $S_2 = \frac{2W^2G}{\beta^2}\left\{\frac{[(2-\beta^2)sh\beta(2X_0-1) + 2\beta K_\delta ch\beta(2X_0-1)][sh\beta +}{[sh\beta +}\right.$ $+ \frac{+3\beta ch\beta X_0 ch\beta(1-X_0)] + 3\beta sh\beta(2X_0-1)][(3\beta ch\beta X_0 +}{+3\beta ch\beta X_0 ch\beta(1-}$ $\left. + \frac{+2sh\beta X_0) sh\beta(1-X_0) + (\beta^2 ch\beta X_0 + \beta sh\beta X_0) K_\delta ch\beta(1-X_0)]}{-X_0)]^2}\right\}$ 3. Приведенная погрешность из-за нелинейности характеристики	

Таблица П1 (продолжение 48)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
		$\gamma_{\varepsilon 2}\% = 50\left\{\frac{(10\beta sh\beta ch\beta + 3sh^2\beta + 3\beta^2 ch^2\beta)(\beta sh\beta + 3\beta^2 ch^2\beta X_{ок}) - (sh\beta + 3\beta ch\beta)^2(2sh^2\beta X_{ок} + 3\beta^2 ch^2\beta X_{ок})}{2[sh^2\beta + 3\beta sh\beta ch\beta(\beta ch\beta + 4\beta sh\beta X_{ок} ch\beta X_{ок} + \beta^2 ch^2\beta X_{ок})]}\right\}.$		характеристики и чувствительность.
		Общие характеристики преобразователей. 1. Относительная температурная погрешность $\gamma_\theta\% = \theta\frac{[(2-\beta^2+4K_\delta\beta^2X_0+4K_\delta X_0^2)X_{м0}/X_м + \frac{X_0}{G}(4X_0 + \beta^4 + 2\beta^2X_0)G_{\delta 0}]\alpha - (1+K_\delta\beta^2X_0+2K_\delta X_0^2)\beta_0^2 m}{2+\beta^2+4K_\delta\beta^2X_0+4K_\delta X_0}\cdot 100\%$ α - линейный температурный коэффициент, m - магнитный температурный коэффициент, $m = \frac{r_{\mu x}^2}{r_\mu^2}\alpha r_{\mu X} - \frac{r_{\mu r}^2}{r_\mu^2}\alpha r_{\mu R}.$ 2. Погрешность от внешнего поля $\gamma_{мвн}\% = \frac{25 B_{вн}\pi d_1^2\beta^2}{J_p W_{ру} G(\beta-1)}.$		
Утяшев Р.И. [235] Методика анализа магнитных цепей	Делительный преобразователь с П-образным магнитопроводом	1. Статическая характеристика $E_{омп} = -j\omega W_n F_p G\frac{(1+2K_1)(K_2+X_{2m}^*)}{2[X_{2m}^*(2+K_1+K_1\beta_1^2)+K_2+2K_1K_2\beta_1^2]},$ *Eo* - э.д.с. измерительной обмотки; *Wn* - число витков измерительной обмотки;	1. Задаются: максимальный диапазон перемещения подвижных сердечников *Xn, Dp* - максимальный рабочий диапазон измеряемых	1. В работе исследуются делительные преобразователи перемещений, выходной сигнал

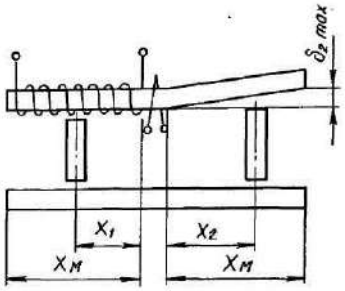
преобразователей с распределенными магнитными параметрами, основанная на введении матричных функций и представлении		ω - круговая частота тока; $X_i^* = \frac{Xi}{X_M}$ - относительная текущая координата; $G=gXM$ - полная проводимость зазора между стержнями канала	соотношений, ***Uвм*** - максимальное выходное напряжение, ***lc*** - длина подвижных сердечников, ***lr*** - высота преобразователя, ***Ку*** - плотность укладки витков в обмотке, ***Jв*** - ток возбуждения, ***g*** -плотность тока, ***Вдоп*** - допустимое значение магнитной индукции, ***Sμ*** - магнитное сопротивление, ***εм*** - максимальная степень	которых пропорционален отношению двух перемещений. 2. При выводе статических характеристик сопротивление стали не учтено. 3. В качестве критерия оптимизации принят минимум максимальной

Таблица П1 (продолжение 51)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
законов изменения магнитных потоков и напряжений вдоль магнитопровода в виде суммы произведений погонной м.д.с. обмотки возбуждения, магнитных потоков и напряжений в начале расчетных участков на соответствующие матричные функции. Использование схем замещения магнитной цепи.		$\beta_1 = \sqrt{g\gamma_\mu}\,x_м$, $\beta_2 = \sqrt{3g\gamma_\mu}\cdot x_м$, ***Ro*** - магнитное сопротивление основания магнитопровода $K_1 = G_1 / G$, $K_2 = G_{2m} / G$, G_1 , G_2 - проводимость зазоров между подвижными сердечниками каналов делимого и делителя и стационарной частью магнитной цепи, $\Delta = (K_1 + 2)\,x_2^* + K_2$, F_p - м.д.с. распределенной обмотки возбуждения. 2. Степень невоспроизведения статических характеристик (степень нелинейности характеристики) $\varepsilon_{мп} = 50\left\{1 - \frac{(1+K_2)\left[x_{2m}^*(2+K_1+K_1\beta_1^2)+K_2(1+2K_1\beta_1^2)\right]}{x_{2m}^*(x_{2m}^*+K_2)\left[2+K_1+K_2+K_1K_2(\beta_1+\beta_2)+\right.}\right.$ $\left.\left. + \beta_1(K_1\beta_1 + K_2\beta_2)\right]\right\}$. 3. Индуктивность обмотки возбуждения	невоспроизведения отношении. 2. Определяются: *h* -ширина стержня магнитопровода, δ - расстояние между стержнями, *Wи* - число витков измерительной обмотки, *Wв* - число витков обмотки возбуждения, *f* - частота источника питания, *L* - общая длина магнитопровода, *hc* - ширина подвижного сердечника, ***b*** - высота стержня магнитопровода, *bc* - толщина подвижного сердечника, $\delta 1, \delta 2$ - воздушные зазоры.	степени невоспроизведения семейства статических характеристик при ограниченных габаритах ДПП. 4. Цели работы: разработка методики анализа магнитных цепей, алгоритмов и программ машинного анализа, определение и анализ погрешностей ДПП, разработка инженерной методики расчета. 5. Использование матричных функций исключает необходимость составления и решения систем дифференциальных уравнении. 6. Магнитное поле между стержнями принято однородным и плоскопараллельным.

		$$L_B = W_B^2 G \left\{ X_1^* \left[\frac{(2K_1X_1^*+1)(2K_2+2X_2^*+X_1^*X_2^*)}{4\Delta} - \right. \right.$$ $$\left. - \frac{X_1^{*2}}{6} \right] + \frac{(X_2^*-X_1^*)}{4\Delta} \left[2K_1X_1^*X_2^*(X_1^*-1) + 2(K_2+ \right.$$ $$+ X_2^*)(1-X_1^*X_2^*) + X_2^*(2K_1+X_1^*+X_2^*) \left. \right] -$$ $$- \frac{(X_2^*-X_1^*)^3}{6} + \frac{(1-X_2^*)^2}{4\Delta} \left[2K_2 + 2X_2^*(K_1+1+ \right.$$ $$\left. \left. + X_2^* - X_2^{*2} - K_1X_1^* + X_2^* \right] - \frac{(1-X_2^*)^3}{6} \right\}.$$		7. Нелинейность кривой намагничивания не учитывается. 8. Начальные значения потоков. *Φi* и напряжений *Fi* в статических характеристиках для ДПП с П- и С-образными магнитопроводами определяются на ЭВМ из решения систем уравнений соответствующих граничных условий.

Таблица П1 (продолжение 52)

Автор и используемый метод	Основная схема исследуемого преобразователя	Полученное математическое описание метрологических характеристик преобразователя	Рекомендуемая методика расчета	Примечания
	Делительный преобразователь перемещений двухстержневой конструкции 	1. Статическая характеристика: - с учетом магнитного сопротивления сердечника $E_{0\underline{II}}=-j\omega W_и F_p \frac{G}{\beta^2\Delta}[\beta K_1 sh\beta X_1^* ch\beta(1-X_1^*)+$ $+2sh\frac{2\beta}{2}][\beta K_2 ch\beta X_2^* ch\beta(1-X_2^*)+X_2^* sh\beta],$ - без учета магнитного сопротивления стали $E_{0м\underline{II}}=-j\omega\frac{W_и F_p G(2K_1+1)(K_2+X_{2m}^*)}{2[(K_1+1)(1+K_2\beta^2)X_{2m}^*+(1+\beta^2K_1)(K_2+X_{2m}^*)]}.$ 2. Степень невоспроизведения статической характеристики $\varepsilon_{M\underline{II}}=50\left\{1-\right.$ $\left.-\frac{(1+K_2)[(K_1+1)(1+K_2\beta^2)X_{2m}^*+(1+K_1\beta^2)(K_2+X_{2m}^2)]}{X_{2m}^*(X_{2m}^*+K_2)[(K_1+K_2\beta^2)+(1+K_1\beta^2)(1+K_2)]}\right\}.$ 3. Индуктивность обмотки возбуждения $L_0=W_0^2G\left\{X_1^*\left[\frac{(2K_1X_1^*+1)(2K_2+2X_2^*+X_1^*X_2^*)}{4\Delta}-\right.\right.$ $-\frac{X_1^{*2}}{6}]+(1-X_1^*)^2[\frac{2K_1X^*(1-X_1^*)+2K_2+3X_2^2}{4\Delta}-$ $\left.\left.-\frac{1-X_1^*}{6}\right]\right\}.$		9. Наибольшее отклонение максимальных значений семейств экспериментальных статических характеристик от теоретических составляет 13,1-14 %. 10. Исследованы переходные процессы в цепи обмоток преобразователя при включении ДПП к источнику напряжения и при ступенчатом перемещении подвижных сердечников. Использованы методы ТАУ. 11. Исследованы нагрузочные и частотные характеристики ДПП. 12. Исследованы погрешности: вызванные отличием функции преобразования
	Делительный преобразователь перемещений с С-образным магнитопро-	1. Статическая характеристика $E_{0мс}=-j\frac{\omega W_и F_p G(1+2K_1)(2K_2+\beta_1^2K_2+2X_{2m}^*)}{4X_{2m}^*(2+K_1+\beta_2^2K_1+\beta_1^2)+2K_2(2+\beta_1^2)(1+\beta_1^2+2\beta_1^2K_1)}.$		

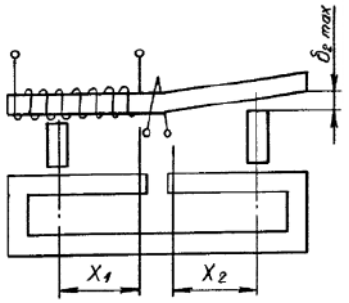
	водом  	2. Степень невоспроизведения статической характеристики $\varepsilon_{мс} = 50\left\{1 - \frac{(1+K_2)\left[2X^*_{2m}(2+K_1+K_2\beta_1^2+ \right.\right.$ $\left.\left. X^*_{2m}\left\{2+K_1+K_2+\beta_1^2\left[1+\right.\right.\right.\right.$ $\left.\left.\left.\left. +\beta_1^2)+K_2(2+\beta_1^2)(1+\beta_1+2K_1\beta_1^2)\right]\right.\right.$ $\left.\left. +2(K_2+2K_1K_2)\right]\right\}(2K_2+K_2\beta_1^2+2X^*_{2m})\right\}$. 3. Индуктивность обмотки возбуждения описывается выражением, аналогичным выражению для предыдущей разновидности датчика.		ДПП от идеальной операции деления; технологические погрешности, вызванные неточным изготовлением элементов магнитопровода; технологические погрешности коэффициента передачи ДПП; темпертурные погрешности. 13. Методика расчета дается применительно к двухстержневой конструкции ДПП. 14. Поле в немагнитных зазорах не рассматривается.
		Температурная погрешность ДПП $\Delta E_{(\theta,B)} = A_{(E,\theta,B)}\,\Delta\theta,$ $\Delta E_{(\theta,h)} = A_{(E,\theta,h)}\,\Delta\theta,$ $\Delta E_{(\theta,h_c)} = A_{(E,\theta,h_c)}\,\Delta\theta,$ где $A_{(E,\theta,B)} = \frac{\partial E}{\partial B}\cdot\frac{\partial B}{\partial\theta} = A_{(E,T,B)}\,B_0\,\alpha,$ $A_{(E,\theta,h)} = \frac{\partial E}{\partial h}\cdot\frac{\partial h}{\partial\theta} = A_{(E,T,h)}\,h_0\,\alpha,$ $A_{(E,\theta,h_c)} = \frac{\partial E}{\partial h_c}\cdot\frac{\partial h_c}{\partial\theta} = A_{(E,T,h_c)}\,h_{c0}\,\alpha,$ θ - температура; h_c - ширина подвижных сердечников; b - высота; h - ширина магнитопровода.		

Таблица П2

Обзор работ по теории индуктивных измерительных преобразователей

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Мильштейн В.Н. [156] 1940 г.	Индуктивный преобразователь с переменным зазором	Выражение для потока в цепи с малым немагнитным зазором	1. Индуктивность катушки преобразователя. 2. Разность индуктивностей дифференциального преобразователя. 3. Максимальная выходная мощность. 4. Электромеханическая сила.	Расчет ампервитков обмотки из условия ограничения нагрева, электромеханической силы	1. Магнитное сопротивление магнитопровода не определяется. 2. Потоки рассеяния не учитываются. 3. Выпучивание поля в зазоре не учитывается. 4. Метрологические характеристики не анализируются.
Дмитриев Е.И. [71] 1945 г.	Индуктивный и трансформаторный дифференциальные преобразователи с переменным зазором	Выражение для потока в цепи с малым немагнитным зазором	1. Выходное напряжение мостовой схемы. 2. Ток в нагрузке трансформаторного преобразователя.	Расчет катушки из условия допустимого нагрева и величины электромеханического усилия	1. Магнитное сопротивление магнитопровода не определяется. 2. Поле в зазоре не исследуется. 3. Метрологические характеристики преобразователя не исследуются.
Куликовский Л.Ф. [134] 1950 г. [135] 1961 г.	Дифференциальный трансформаторный преобразователь с переменным зазором	Методы магнитостатики. Схемы замещения магнитной цепи и законы Кирхгофа	1. Выходное напряжение. 2. Чувствительность преобразователя по напряжению. 3. Тяговые усилия на якорь. 4. Предел измерения. 5. Динамическая погрешность.	Проверочный расчет отдельных характеристик для выбранной конструкции преобразователя с рекомендациями по выбору соотношений его параметров	1. Потоки рассеяния не учитываются. 2. Геометрические размеры магнитопровода в расчетных формулах не учтены. 3. Экспериментально оценивается выпучивание поля в зазоре. 4. Используется экспериментальная кривая намагничивания на переменном токе.

Продолжение 1 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Сотсков Б.С. [219] 1950 г. [218] 1965 г.	Одинарный и дифференциальный датчик с переменным зазором. Трансформаторный датчик соленоидного типа.	Методы магнитостатики. Уравнения Кирхгофа для магнитной цепи.	1. Индуктивность катушки с сердечником. 2. Ток в нагрузке. 3. Сила притяжения якоря. 4. Трансформаторная ЭДС вторичной обмотки.	Графоаналитический расчет характеристики. Расчет катушки из условий нагрева и обеспечения требуемой м.д.с.	1. Учитывается кривая намагничивания материала. 2. Выпучивание поля в зазоре учитывается по эмпирическим формулам, либо методом построения поля в зазоре. 3. Учитывается распределение потока вдоль магнитной цепи.
Wiemer A. Lehmann R. [293] 1954 г.	Дифференциальный преобразователь с переменным зазором	Выражение для потока в магнитной цепи с малым немагнитным зазором	1. Индуктивность катушек. 2. Выходное напряжение мостовой схемы включения.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются. Приведен ряд общих рекомендаций	1. Анализ магнитной цепи преобразователя не производится. Нелинейность намагничивания материала и картина поля в зазоре не исследуются. 2. Метрологические характеристики не исследуются.
Ступель Ф.А. [225] 1958 г. [226] 1965 г.	Одинарный индуктивный датчик с переменным зазором и дифференциальный соленоидный датчик	Выражение для индуктивности катушки с сердечником и малым воздушным зазором в сердечнике	1. Ток в нагрузке. 2. Индуктивность катушки. 3. Выходная ЭДС. 4. Динамическая погрешность.	Расчет обсуждается в общем виде без приведения конкретных расчетных зависимостей	1. Магнитный поток в магнитопроводе не определяется. 2. Расчет метрологических характеристик преобразователя и его конструктивный расчет рассматриваются. 3. Распределение потока в зазоре не определяется.

Продолжение 2 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Harry Herold [277] 1962 г.	Индуктивный одинарный датчик с переменным зазором и дифференциальный соленоидный датчик	Методы расчета электрических цепей на переменном токе	1. Выходное напряжение на обмотке (обмотках) преобразователя. 2. Усилие перемещения якоря. 3. Переходный процесс в цепи преобразователя при ступенчатом смещении якоря.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются	1. Вопросы теории магнитной цепи преобразователя не рассматриваются. 2. Рассмотрен режим гармонических вибраций подвижного якоря.
Федотов А.В. [243] 1965 г.	Индуктивный бесконтактный датчик размеров с переменным зазором	Расчет магнитного потока через магнитные сопротивления и проводимости участков магнитопровода	1. Функция преобразования по индуктивности и полному сопротивлению катушки. 2. Чувствительность датчика. 3. Пределы измерения при допустимой нелинейности характеристики.	Проверочный расчет преобразователя с определением его характеристик преобразования, чувствительности и пределов измерения	1. Учитывается фактор размагничивания сердечника. 2. Учтены размеры катушки и ее положение на сердечнике. 3. Учитываются потери в сердечнике. 4. Потоки рассеяния и выпучивание поля в зазоре не учитываются.
Цикерман Л.Я. Котляр Р.Ю. [257] 1966 г.	Одинарный индуктивный и дифференциально-трансформаторный преобразователи с переменным зазором	Методы магнитостатики. Уравнения Кирхгофа для магнитной цепи	1. Индуктивности обмоток преобразователя. 2. Ток в нагрузке. 3. Выходное напряжение трансформаторного преобраоателя. 4. Чувствительность. 5. Сила притяжения якоря.	Приводятся общие указания по проверочному расчету отдельных параметров преобразователя без рассмотрения метоики	1. Расчет магнитной цепи преобразователя и его метрологических характеристик не рассматривается. 2. Особенности магнитных потоков в немагнитных зазорах не рассматриваются.

Продолжение 3 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Woschni H.G. [294] 1966 г.	Одинарный индуктивный датчик с переменным зазором и соленоидный датчик	Методы расчета электрических цепей	1. Индуктивность катушки. 2. Полное сопротивление преобразователя.	Вопросы расчета не рассматриваются. Приводится ряд рекомендаций по выбору параметров преобразователя	1. Вопросы расчета и анализа магнитной цепи преобразователя не рассматриваются. 2. Метрологические характеристики не исследуются. 3. Приведена обширная классификация погрешностей.
Зарипов М.Ф. [80] 1968 г. [79] 1969 г.	Преобразователи с распределенными электромагнитными параметрами. Ряд разновидностей одинарных и дифференциальных преобразователей с подвижными обмотками, сердечниками или экранами	Методы магнитостатики. Использование схем замещения и решение уравнений Кирхгофа для магнитной цепи с учетом распределенности электромагнитных параметров вдоль цепи	1. Статическая характеристика. 2. Степень нелинейности характеристики. 3. Чувствительность. 4. Погрешность от нелинейности. 5. Технологические погрешности изготовления и сборки преобразователя. 6. Температурная погрешность. 7. Погрешность от внешних ферромагнитных масс и магнитных полей. 8. Погрешность от нелинейности основной кривой намагничивания.	По заданным параметрам питания, диапазону перемещений, степени нелинейности, чувствительности, магнитным характеристикам материала производится расчет магнитопровода и параметров обмотки с использованием ряда рекомендаций по выбору соотношений параметров	1. Продольные размеры сосредоточенных обмоток и подвижных элементов не учитываются. 2. Расчет магнитной проводимости зазора основан на методе Б.К.Буля. 3. Магнитное поле принято плоско-параллельным. 4. Для расчета используется ряд экспериментальных данных. 5. Указывается на невозможность разработки единой и полной методики расчета преобразователей с распределенными параметрами.

Продолжение 4 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Белый М.И. [28] 1968 г. [27] 1969 г.	Электромагнитные измерительные преобразователи с распределенными параметрами. Разновидности с подвижной рамкой, с подвижным сердечником и ферродинамический	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа с учетом распределенности электромагнитных параметров вдоль магнитопровода преобразователя	1. Статическая характеристика. 2. Нелинейность характеристики. 3. Чувствительность преобразователя. 4. Тяговое усилие. 5. Относительная стандартная погрешность от температуры. 6. Динамическая погрешность. 7. Технологические погрешности изготовления и сборки.	Графоаналитический проверочный расчет преобразователя с целью нахождения распределения магнитного потока в цепи	1. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры. 2. Кривая намагничивания аппроксимируется гиперболическим синусом. 3. Влияние зазоров на магнитный поток учитывается экспериментально. 4. При расчете магнитных сопротивлений и проводимостей используется метод Б.К.Буля. 5. Для решения дифференциальных уравнений использована ЭВМ.
Жиров В.Г. [76] 1970 г. [77] 1974	Магнитомодуляционный функциональный преобразователь с профилированным магнитом	Методы магнитостатики. Графоаналитический метод решения уравнений Кирхгофа	1. Функциональная статическая характеристика. 2. Чувствительность по току. 3. Температурная погрешность. 4. Динамическая погрешность. 5. Технологические погрешности. 6. Режимные погрешности.	Вопросы расчета подробно не рассматриваются. Производится ряд рекомендаций по выполнению отдельных конструктивных параметров преобразователя	1. Коэффициенты рассеяния магнитного потока определяются методом математического моделирования. 2. Нелинейность кривой намагничивания не учитывается. 3. Выражения для метрологических характеристик не содержат в явном виде конструктивные параметры. 4. Магнитный поток в стали и зазорах не исследуется детально.

Продолжение 5 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Рашкович М.П. Рашкович П.М. Шкловский Б.И. [192] 1969 г.	Индуктивный преобразователь с переменным зазором, преобразователь с зубчатым якорем	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа и использование схем замещения магнитной цепи	1 Полное сопротивление катушки. 1. Чувствительность. 2. Сила воздействия на якорь. 3. Напряжение на измерительных обмотках.	Графоаналитический расчет зависимости полного сопротивления преобразователя от зазора для определенной конструкции	1 Расчет поля в зазорах предлагается производить по Г.Ротерсу и Б.К.Булю. 1. При определении магнитного сопротивления стальных участков используются экспериментальные значения удельных магнитных сопротивлений. 2. Анализ метрологических характеристик не производится.
Kautsch R. [281,282] 1970 г.	Индуктивный преобразователь соленоидного типа	Методы расчета электрических цепей	1. Индуктивность преобразователя. 2. Напряжение на обмотке. 3. Электромагнитная сила. 4. Погрешность от напряжения шумов.	Определенной методики расчета не предлагается. Дается ряд рекомендаций по выполнению соотношений параметров	1. Анализ магнитной цепи преобразователя не производится. 2. Рассмотрен режим гармонических вибраций якоря. 3. Анализ метрологических характеристик не производится.
Моисеев В.С. [160] 1970 г.	Индуктивный соленоидный датчик	Методы теории поля. Использование понятия векторного потенциала	1. Функция преобразования. 2. Чувствительность.	Методика расчета не предлагается. Приводится ряд рекомендаций по параметрам	1. Учтен фактор размагничивания разомкнутого сердечника. 2. Метрологические характеристики подробно не рассматриваются.

Продолжение 6 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Дадашева Р.Б. [68] 1972 г.	Индуктивный дифференциальный датчик с переменным зазором	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа для магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Чувствительность. 3. Температурная погрешность.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются	1. Не учитываются потоки рассеяния и картина поля в зазоре. 2. Нелинейность намагничивания не учитывается. 3. Метрологические характеристики детально не исследуются и не выражаются в явном виде через конструктивные параметры.
Лиманов И.А. [147] 1972 г.	Индуктивный преобразователь с подвижным сердечником и экранами	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа для магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Степень нелинейности характеристики. 3. Чувствительность к перемещению. 4. Тяговое усилие. 5. Температурная погрешность. 6. Погрешность от внешнего магнитного поля. 7. Динамическая погрешность.	Рассматривается проверочный расчет для заданной схемы преобразователя. Конкретные расчетные выражения с использованием метрологических характеристик не приводятся	1. Использованы упрощенные картины распределения магнитных потоков. 2. Нелинейность намагничивания не учитывается. 3. Потоки выпучивания в зазорах не учитываются. 4. Метрологические характеристики преобразователя детально не исследуются.
Востриков Ю.А. [52] 1972 г.	Дифференциально-трансформаторный соленоидный преобразователь	Методы теории вероятности и математической статистики	1. Характеристика преобразователя.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются	1. Расчет и анализ магнитной цепи преобразователя не производится. 2. Метрологические характеристики не исследуются.

Продолжение 7 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Рыбиков Н.Н. [202] 1972 г.	Индуктивный соленоидный преобразователь	Методы теории поля	1. Градуировочная характеристика преобразователя. 2. Чувствительность. 3. Относительная погрешность от нелинейности.	Вопросы расчета преобразователя не рассматриваются	1. Нелинейность намагничивания не учитывается. 2. Учтен фактор размагничивания разомкнутого сердечника.
Кондрашова Л.А. [116] 1973 г.	Дифференциальные индуктивные датчики линейных перемещений с переменным зазором, переменной площадью зазора и с подвижными катушками	Методы магнитостатики. Графоаналитический метод решения уравнений Кирхгофа для магнитной цепи	1. Характеристика «вход-выход». 2. Чувствительность. 3. Тяговые усилия или электромагнитный момент. В выражения характеристик не входят в явном виде конструктивные параметры преобразователя.	Вопросы расчета специально не рассматриваются	1. При расчете магнитопровода преобразователя используются методы Б.К.Буля для расчета магнитных цепей. 2. Магнитное поле принято плоскопараллельным. 3. Магнитная проводимость зазоров определяется путем построения картины поля. 4. Используются удельные магнитные сопротивления материала.
Конюхов Н.Е. [139] 1971 г. [117] 1973 г. [118] 1977 г.	Функциональные преобразователи с профилированной плоской обмоткой и с подвижным короткозамкнутым витком	Методы магнитостатики. Графоаналитический метод решения уравнений Кирхгофа для магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Суммарная температурная погрешность. 3. Относительная погрешность от влияния внешнего магнитного поля. 4. Динамическая погрешность.	Расчет рассматривается на примерах. Рассчитываются магнитные проводимости зазоров и их оптимальные величины из условия максимальной чувствительности	1. Учитываются нелинейность и гистерезис намагничивания. 2. При расчете магнитных проводимостей зазоров используется метод Б.К.Буля. Метрологические характеристики не содержат в явном виде конструктивные параметры преобразователя и не исследуются подробно.

Продолжение 8 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Макаров Т.А. [153] 1973 г.	Двух обмоточный и трех обмоточный преобразователи перемещений	Методы магнитостатики с пренебрежением сопротивлением стали	1. Напряжение на измерительной обмотке. 2. Чувствительность.	Проверочный расчет конструкции преобразователя по упрощенным зависимостям	1. Для расчета магнитных проводимостей зазоров используется метод Б.К.Буля. 2. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры преобразователя.
Никитин В.Г. [166] 1973 г.	Дифференциально-трансформаторный преобразователь перемещений с подвижной обмоткой.	Методы магнитостатики с решением уравнений Кирхгофа для магнитной цепи	1. Характеристика преобразования. 2. Температурная погрешность. 3. Погрешность от колебаний частоты питания. 4. Погрешность от внешних полей.	Вопросы расчета специально не рассматриваются	1. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры преобразователя. 2. Средняя кривая намагничивания аппроксимируется полиномом.
Ковалевский В.В. [110] 1974 г.	Бесконтактный индуктивный датчик размеров с переменным зазором	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа с учетом размагничивания сердечника и поверхностного эффекта в детали	1. Характеристика преобразователя. 2. Чувствительность.	Приведены расчетные таблицы сочетаний конструктивных параметров преобразователя и соответствующих им метрологических характеристик. Методика расчета не рекомендуется	1. Индуктивность преобразователя и его чувствительность по индуктивности выражены в явном виде через конструктивные параметры преобразователя и измеряемое перемещение. 2. Коэффициент размагничивания сердечника принят равным коэффициенту эквивалентного цилиндра.

Продолжение 9 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Нересян В.Б. [164] 1974 г.	Функциональный преобразователь малых линейных перемещений с плоскими измерительными обмотками	Методы магнитостатики. Решение уравнений Кирхгофа для магнитной цепи. Учет картины поля в зазоре и нелинейности намагничивания	1. ЭДС измерительной обмотки. 2. Чувствительность. 3. Погрешность старения. 4. Температурные погрешности. 5. Погрешность от внешнего магнитного поля. 6. Динамическая погрешность. 7. Технологические и режимные погрешности.	В законченном виде методика расчета не сформулирована. Приводится ряд рекомендаций по выбору соотношений конструктивных параметров	1. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры преобразователя. 2. Поле в зазоре определяется построением геометрической картины поля. 3. Кривая намагниченности аппроксимируется функцией гиперболического синуса.
Савич А.И. [203] 1974 г.	Бесконтактный индуктивный датчик размеров и перемещений с переменным зазором	Методы магнитостатики с учетом картины распределения поля в зазоре по методу Г.Ротерса	1. Индуктивность преобразователя. 2. Погрешность измерения от перекосов измерительной поверхности.	Методика расчета преобразователя не рассматривается	1. Особенности магнитного потока ферромагнитных участков не учитываются.
Семерджиев А.Х. [211] 1974 г.	Соленоидный индуктивный датчик	Методы магнитостатики с учетом картины поля в воздухе по методу Г.Ротерса	1. Полное сопротивление катушки датчика.	Методика расчета преобразователя не рассматривается	1. Используются удельные магнитные сопротивления материала.
Срибнер Л.А. [223] 1975 г.	Дроссельный трансформаторный преобразователь с переменным зазором	Методы магнитостатики с учетом распределения поля в зазоре путем	1. Индуктивность преобразователя. 2. Чувствительность. 3. Относительная погрешность преобразователя.	Рассматривается проверочный расчет преобразователя с определением его статической	1. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры преобразователя.

Продолжение 10 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
		построения его картины или по методу Б. Буля		характеристики.	2. Указывается на необходимость учета поверхностного эффекта.
Богданова Н.А. [36] 1975 г.	Преобразователь перемещений с распределенными параметрами и постоянными магнитами	Методы магнитостатики с учетом распределенности электромагнитных параметров длинной магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Степень нелинейности. 3. Технологические погрешности преобразователя. 4. Температурная погрешность. 5. Погрешность от внешнего поля.	Конструктивный расчет преобразователя по величине ЭДС, диапазону перемещений и заданным отдельным размерам	1. При анализе и расчете магнитной цепи используется метод М.Ф.Зарипова. 2. Вопросы расчета элементов магнитопровода не рассматриваются. 3. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры.
Фикс-Марголина И.Г. [252] 1975 г.	Датчик перемещений с распределенными параметрами и подвижной измерительной обмоткой	Методы магнитостатики с учетом нелинейности характеристики намагничивания	1. Статическая характеристика датчика. 2. Степень нелинейности характеристики. 3. Чувствительность. 4. Погрешность от нелинейности.	По заданному режиму работы и частично заданным конструктивным параметрам определяются недостающие конструктивные параметры для обеспечения минимальной чувствительности, диапазона измерения и нелинейности	1. Магнитное сопротивление магнитопровода не учитывается. 2. Метрологические характеристики преобразователя не выражены в явном виде через конструктивные параметры. 3. Учет нелинейности намагничивания производится путем аппроксимации зависимости удельного магнитного сопротивления материала от индукции полиномом.

Продолжение 11 табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Гераськов В.Л. [57] 1975 г.	Преобразователь перемещений на принципе индукционной подвески	Методы магнитостатики, использование метода суперпозиций	1. Полное сопротивление обмотки возбуждения. 2. Выходная характеристика. 3. Чувствительность. 4. Нелинейность выходной характеристики.	Методика расчета не рассматривается. Приводится ряд рекомендаций по выбору параметров.	1. Метрологические характеристики не выражены в явном виде через конструктивные параметры. 2. Нелинейностью намагничивания пренебрегается.
Кирюшин Г.Н. [106] 1976 г.	Индуктивный преобразователь перемещений с плоской измерительной обмоткой и совмещенными функциями	Методы магнитостатики. Использование элементов теории поля	1. Выходная ЭДС преобразователя в схеме транзисторного релаксационного генератора.	Вопросы расчета непосредственно для индуктивного преобразователя не рассматриваются	1. Вопросы расчета магнитопровода не рассматриваются. 2. Исследование метрологических характеристик не производится.
Зарипов М.Ф. Ураксеев М.М. [85] 1976 г.	Функциональный преобразователь с профилированной плоской обмоткой	Методы магнитостатики. Метод расчленения магнитной цепи на участки. Исследуется магнитная цепь с распределенными параметрами	1. Статическая характеристика. 2. Технологические погрешности. 3. Погрешность от магнитного гистерезиса. 4. Погрешность от нестабильности питания. 5. Погрешность от внешнего ферромагнитного поля. 6. Погрешность от внешней ферромагнитной массы.	Обсуждается методика расчета в общем виде с исследованием некоторых параметров на экстремум. Конкретных выражений для расчета не приводится	1. Метрологические характеристики не выражены через конструктивные параметры преобразователя в явном виде. 2. Сравниваются методы расчета магнитной цепи: упрощенный с пренебрежением одного из распределенных параметров; с помощью трубок магнитного потока; с помощью схем замещения; метод последовательных приближений и классический.

Окончание табл. П2

Автор	Тип исследуемого преобразователя	Метод анализа магнитной цепи	Аналитические описания метрологических характеристик	Особенности рекомендуемого расчета	Примечания
Черных В.В. [261] 1976 г.	Индуктивный первичный преобразователь перемещений с распределенными параметрами и подвижным сердечником	Методы магнитостатики с учетом распределенного характера магнитного потока вдоль магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Степень нелинейности. 3. Чувствительность. 4. Приведенная погрешность из-за нелинейности характеристики. 5. Относительная температурная погрешность. 6. Погрешность от внешнего поля. 7. Технологические и эксплуатационные погрешности.	Конструкторский расчет преобразователя по заданной чувствительности, степени невоспроизведения статической характеристики и диапазону перемещений с учетом рекомендуемых оптимальных соотношений	1. Приведенные выражения для метрологических характеристик не решены окончательно относительно конструктивных параметров преобразователя. 2. Нелинейность намагничивания не учитывается. 3. Поле в области зазора принято плоскопараллельным.
Утяшев Р.И. [235] 1978 г.	Делительный преобразователь перемещений с распределенными магнитными параметрами	Методы магнитостатики с учетом распределенного характера магнитного потока и схем замещения магнитной цепи	1. Статическая характеристика. 2. Степень нелинейности статической характеристики. 3. Температурная погрешность. 4. Технологические погрешности.	Расчет ряда конструктивных параметров преобразователя по другим заданным параметрам, диапазону измерения и выходному напряжению. Приведены алгоритмы для расчета на ЭВМ распределения магнитного потока в цепи.	1. Исследуются преобразователи с выходным сигналом пропорциональным отношению двух перемещений. 2. В выражениях метрологических характеристик сопротивление ферромагнитных участков не учтено. 3. В качестве критерия оптимизации принята степень невоспроизведения характеристики.

Алексей Васильевич Федотов,
канд. техн. наук, доцент

Теория и расчет
индуктивных датчиков перемещений
для систем автоматического контроля
Монография

Редактор *Ю.Ю. Аптрашева*
ИД № 06039 от 12.10.2001 г.
Сводный темплан 2011 г.

Подписано в печать 25.01.11. Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16.
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. 11,75.
Тираж 100 экз. Заказ 124.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр-т Мира,11; т. 23-02-11
Типография ОмГТУ