

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ  
ИЛМий КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАХМУДОВ ТОХИР ФАРХАДОВИЧ**

**БОШҚАРИЛАДИГАН ЭЛЕКТР ТИЗИМЛАРИ ЎТКИНЧИ  
ҲОЛАТЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ЭТИШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.05.02 – Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.  
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент-2020**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Content of the dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)  
on technical sciences**

**Махмудов Тохир Фархадович**

Бошқариладиган электр тизимлари ўткинчи ҳолатларини таҳлил этиш  
усуллари ва алгоритмлари..... 3

**Махмудов Тохир Фархадович**

Методы и алгоритмы исследования переходных режимов управляемых  
электрических систем..... 23

**Makhmudov Tokhir Farkhadovich**

Methods and algorithms for researching transient modes of controlled  
electrical systems..... 43

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 47

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ  
ИЛМий КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАХМУДОВ ТОХИР ФАРХАДОВИЧ**

**БОШҚАРИЛАДИГАН ЭЛЕКТР ТИЗИМЛАРИ ЎТКИНЧИ  
ҲОЛАТЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ЭТИШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.05.02 – Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.  
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент-2020**

**Техника фанлар бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида №В2019.2. PhD/Т602 рақами билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Аллаев Кахраман Рахимович**  
техника фанлари доктори, профессор,  
академик

**Расмий оппонентлар:**

**Пирматов Нурали Бердиярович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Садуллаев Насулло Нематович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**


**«Иссиқликэлектрлойиха» АЖ**


Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «25» ноябр соат 13<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўча, 2-уй. Тел./факс: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).


Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (13 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўчаси, 2-уй. Тел.: (99871) 227-03-41.

Диссертация автореферати 2020 йил «13» ноябр куни тарқатилди.  
(2020 йил «13» ноябр даги рақамли реестр баённомаси).



  
**Р.А. Захидов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси ўринбосари,  
техника фанлари доктори, профессор, академик

  
**О.Х. Ишназаров**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

  
**М.И. Ибадуллаев**  
Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,  
техника фанлари доктори, профессор

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертация аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда электр энергияга бўлган талабнинг юқори суръатларда ўсиши натижасида энергетика тизимининг турғунлик захирасини аниқлашга алоҳида аҳамият берилмоқда. Шу сабабли, «истеъмолчиларни узлуксиз электр энергия билан таъминлаш учун, биринчи навбатда энергетик тизимларининг турғун ишлашини таъминлаш талаб қилинади»<sup>1</sup>. Энергетика соҳасининг ҳавфсизлиги, унинг ишончлилиги ва самарадорлиги давлатнинг барқарор ривожланиши учун ҳал этувчи унсурлардан ҳисобланади. Шу билан бир қаторда, ўткинчи ҳолатларни самарали таҳлил этиш ва уларни бошқариш, энергетик тизимларининг эксплуатацион кўрсаткичларини яхшилаш каби масалалар муҳим аҳамият касб этади. Бу борада, жумладан, замонавий ҳисоблаш усуллари ва интеллектуал бошқарув мосламаларини қўллаш орқали электр энергетик тизимларининг турғунлиги ва динамик хусусиятларини оширишга қаратилган тадқиқотларга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда ўз-ўзини соловчи автоматик бошқарув тизимларини куриш, лойқа-нейрон (лойқа-нейронли) моделлар асосида бошқариш тизимлари, мураккаб электр энергетик тизимларининг турғунлигини тадқиқ қилиш алгоритмлари ва усуллари, шунингдек, энергетик объектларни автоматлаштириш масалаларини ҳал этишга қаратилган дастурий таъминот тизимларини ишлаб чиқишга қаратилган тадқиқот усуллари олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, биринчидан, рақамли ҳисоблаш технологиялари кескин ривожланиб, натижада техник ва дастурий таъминотларнинг иш унумдорлиги кескин ошди. Шу билан бирга, иккинчидан, HVDC ва FACTS каби узатиш технологияларини қўллаш энергетик тизимда янгича бошқарув усулларида фойдаланиш, электр тармоқларининг қувватни узатиш имконини ошириш ва мониторинг қилиш каби янги имкониятларни берди. Шу сабабли, электр тизимларининг мураккаблиги, уларнинг динамикаси ва бир вақтнинг ўзида ўзаро таъсир қилувчи ташқи омилларнинг таъсирини тўғри режалаштириш ва лойиҳалашни таъминлаш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Республикамызда иқтисодиётнинг муҳим тармоқларидан бири ҳисобланган энергетика соҳасини барқарор ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «...иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш, иқтисодиёт тармоқларида меҳнат унумдорлигини ошириш...»<sup>2</sup> вазифаси қўйилган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда долзарб муаммолардан бири бу бошқариладиган электр энергетик тизимларининг ўткинчи ҳолатларини ўрганиш ва бунда матрица усуллари

<sup>1</sup> <http://www.sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/article/state-problem/>

<sup>2</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони

асосида алгоритмларни ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири деб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисидаги» ПФ-4947-сонли Фармони, Президентнинг 2018 йил 23 октябрдаги «Электр энергетикасини жадал ривожлантириш ва молиявий барқарорлигини таъминлаш чора-тадбирлари тўғрисида» ПҚ-3981-сонли Қарори ва 2016 йил 15 июлдаги «Электр энергетикасида илмий-техник фаолиятни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ПҚ-2559-сонли Қарори, Ўзбекистон Республикасининг 2009 йил 30 сентябрдаги «Электр энергетикаси тўғрисида»ги Қонунларни ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантириш устивор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энергия-ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Электр тизимларининг ўткинчи ҳолатларини ўрганиш учун самарали алгоритмларни ишлаб чиқишнинг долзарб муаммоларини ҳал қилишга қаратилган илмий тадқиқотлар, дунёнинг етакчи илмий марказлари ва олий ўқув юртларида олиб борилмоқда. Хусусан, жумладан Миллий тадқиқот университетида (МЭИ, Россия), юқори кучланишли ўзгармас ток орқали электр энергияни узатиш илмий-тадқиқот институтида (НИИПТ, Россия), Иваново давлат энергетика университетида (Россия), Санкт-Петербург давлат техника университетида (Россия), Massachusetts Institute of Technology (MIT, АҚШ), California Institute of Technology (АҚШ), National University of Singapore (NUS, Сингапур), Delft University of Technology (Нидерландия), Seoul National University (Жанубий Корея), Тошкент давлат техника университетида, Илмий-техник марказ МЧЖ ва «Энергомарказ» МЧЖ (Ўзбекистон) ва бошқаларда.

Бошқариладиган электр тизимларининг ўткинчи ҳолатлари ва турғунлигини таҳлил этишнинг илмий муаммоларини ҳал этишда, шунингдек тизимларнинг турғунлиги ва бошқариш назариясини ишлаб чиқишда, шу жумладан қўзғатиш автоматик ростлагичларини (ҚАР) яратишда Горев А.А., Жданов П.С., Веников В.А., Мисриханов М.Ш., Зеккел, Совалов С.А., Литкенс И.В., Васин В.П., Андреюк В.А., Андерсон П. (Anderson P.), Фуад А. (Fouad A.), Кундур П. (Kundur P.), Байерс Р. (Byers R.), Гонен Тюран (Gonen Turan), каби таниқли хорижий олимлар, шунингдек, Фозилов Х.Ф., Абдуллаев Д.А., Носиров Т.Х., Аллаев К.Р., Ғойибов Т.Ш., Мирзабаев А.М. ва бошқа маҳаллий олимлар катта ҳиссаларини қўшганлар.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, бошқариладиган мураккаб электр энергетик тизимларининг ўткинчи ҳолатларини ўрганиш, синхрон генераторлардаги қўзғатишни автоматик ростлаш тизимларининг соzлаш

параметрларини танлаш, ҳам нормал ҳам авария ҳолатларда, турли хил ҳолат омилларининг ўзаро таъсири муаммолари етарли даражада ўрганилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасининг илмий – тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетида амалга оширилаётган ОТ-Атех-2018-(517+513+362) «Фотоэлектр тизимларни марказий электр тармоғига интеграцияси» (2018-2020 йй.) мавзусидаги илмий тадқиқот ишининг режаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** кўзғатишни автоматик ростлагичларини шакллантириш учун такомиллаштирилган конунларга асосланган усуллар, алгоритмлар ва дастурий воситаларни ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

мураккаб электр тизимларининг турғунлигини ўрганишнинг замонавий усуллари ва алгоритмларини таҳлил этиш;

синхрон машиналарнинг абсолют бурчакларини ҳисобга олган ҳолда кўп машинали электр энергетик тизимининг матрицали математик моделини ишлаб чиқиш;

матрица усулларида фойдаланган ҳолда электр тизимларининг статик турғунлигини таҳлил этиш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

матрицаларнинг декомпозицияси ва канонизацияси услубига асосланган, турғунлик чегараларини ошириш учун электр тизимларининг кутбларини силжитишга имкон берадиган усулни ишлаб чиқиш;

матрицавий усуллар асосида синхрон генераторлардаги кўзғатишни автоматик ростлаш тизимларининг сошлаш параметрларини ҳисоблашнинг математик модели ва алгоритмларини ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** кўзғатишни автоматик ростлагичларга эга синхрон генераторларни ҳисобга олган ҳолда мураккаб электр энергетик тизимлари ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг предмети** электр энергетик тизимларининг ўткинчи ҳолатларини таҳлил этиш усуллари ва алгоритмлари, автоматик кўзғатишни ростлаш тизимларининг сошлаш кўрсаткичларини ҳисоблаш усуллари ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Белгиланган вазифаларни ҳал этиш учун электр тизимларининг турғунлиги назарияси, электр энергетик тизимларининг барқарорлашган ҳолатлари назарияси, квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси, шунингдек замонавий матрицалар назариясига асосланган декомпозиция усули қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгиллиги** қуйидагилардан иборат:

синхрон генераторларнинг абсолют бурчакларига нисбатан мураккаб электр энергетик тизимларнинг матрицавий математик модели ишлаб чиқилган;

мураккаб электр тизимида турғунлик чегарасига биринчи бўлиб яқинлашувчи генераторни (станцияни) аниқлаш усули ва дастури ишлаб чиқилган;

электр энергетик тизимларини математик моделининг матрицали узатиш функцияси кутбларини силжитиш орқали тизим турғунлигини таъминлаш усуллари такомиллаштирилган;

синхрон машиналар қўзғатишни автоматик ростлагичининг матрицавий математик модели ва бошқарув матрицаси кўрсаткичлари ва коэффицентларини аниқлаш дастури ишлаб чиқилган;

турғунлик чегараларини ошириш учун электр тизимларининг кутбларини силжитиш имконини берадиган, матрицаларнинг декомпозиция ва канонизацияси усулларига асосланувчи алгоритм ва дастур ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

электр энергетик тизимларининг диспетчерлик хизматларида фойдаланишга тавсия этилаётган, синхрон генераторлар абсолют бурчагини ҳисобга олиш асосида, мураккаб электр тизимларнинг ўткинчи ҳолатларини ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

электр тизимларини лойиҳалаштиришда турли ҳисоб-китобларни амалга ошириш имконини берадиган, турғунлик чегарасини ошириш алгоритмлари ва дастури ишлаб чиқилган;

бошқариладиган электр тизимларида кичик тебранишларни ўрганиш учун, тизимларни киритиш технологиясига асосланган, самарали алгоритм ва дастур ишлаб чиқилган;

электр тизимларнинг демпферловчи хусусиятларини яхшилаш мақсадида, тадқиқ қилинаётган тизимнинг узатиш функцияси кутбларини тўлиқ жойлаштириш алгоритми ва дастури яратилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** электр тизимлари турғунлиги назариясининг амалда тасдиқланган математик усуллари, тугун кучланишлари усули ва квадратик шаклидаги Ляпунов функцияларнинг қўлланилиши ва матрицалар назариясига асосланган замонавий восита ва усуллардан фойдаланган ҳолда амалга оширилган кўплаб экспериментал ҳисоб-китоблар ёрдамида тасдиқланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот жараёнида олинган натижаларнинг илмий аҳамияти, апериодик бузилиш, ўз-ўзидан чайқалиш, ўз-ўзини қўзғатиш каби турғунлик бузилишларини ҳисобга олган ҳолда, мураккаб электр энергетик тизимларининг статик турғунлигини ягона усул билан чуқур ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти ишлаб чиқилган алгоритм ва дастурларни, диспетчерлик бошқаруви амалиётида, электр энергетик тизимларнинг турғунлигини, турғунлик чегарасига биринчи бўлиб яқинлашадиган генераторларни аниқлашда фойдаланиш имкониятидан иборат.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ўзбекистон энергетика тизимининг ишлаб чиқарувчи блокларининг турғунлик чегаралари ва ушбу чегарага яқинлашувчи генераторларни олдиндан аниқлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

энергетик жиҳозларни ишлатиш жараёнида шикастланишлар натижасида етказилган зарарни аниқлаш бўйича услуги жорий этилган Тизим хизматлари



бош бошқармасида жорий этилган («Ўзбекистон миллий электр тармоқлари» АЖнинг 2020 йил 17 сентябрдаги 01-02-06/3237-сонли маълумотномаси). Натижада ишлаб чиқилган услуб ёрдамида 150 545,7 минг сўм миқдоридagi иқтисодий самарадорликни олиш имконини берган.

бошқариладиган электр тизимларнинг турғунлик чегараларини аниқлаш алгоритми ва дастури Тизим хизматлари бош бошқармасида жорий этилган («Ўзбекистон миллий электр тармоқлари» АЖнинг 2020 йил 17 сентябрдаги 01-02-06/3237-сонли маълумотномаси). Натижада энг кичик турғунлик захираларига эга бўлган генерацияловчи тугунларнинг қийматларини аниқлаш имконини берган: Туямуюн ГЭС - чегаравий бурчаги 118.9 эл. град.; Тахиатош ИЭС - чегаравий бурчаги 121,4 эл. град.

электр энергетик тизимларнинг динамик хусусиятларини ва уларнинг бошқариш тизимларининг тадқиқ этиш учун ишлаб чиқилган усуллар ва алгоритмлар Тизим хизматлари бош бошқармасида жорий этилган («Ўзбекистон миллий электр тармоқлари» АЖнинг 2020 йил 17 сентябрдаги 01-02-06/3237-сонли маълумотномаси). Натижада, электр энергетика тизимларида кичик ва катта турткилардан юзага келувчи ўткинчи жараёнларнинг сўниш вақти 10 сониягача камайтириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 18 халқаро ва 2 республика илмий-техник ва илмий-амалий конференцияларида апробациядан ўтказилди.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 44 та илмий мақола чоп этилган. Шулардан докторлик диссертацияларининг асосий илмий натижаларини нашр этиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда 11 та илмий мақола, шу жумладан республика миқёсида 3 та ва хорижда 8 та (2 та Scopus). Шу билан бирга, Ўзбекистон интеллектуал мулк агентлиги томонидан компьютер дастурларига бериладиган 5 та гувоҳнома мавжуд.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 153 бетни ташкил этади.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

**Ишнинг кириш қисмида** диссертация тадқиқотининг долзарблиги асосланди, тадқиқотнинг мақсади ва вазифаларини шакллантирилди, тадқиқот объекти ва предмети тақдим этилди, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва техника тараққиётининг устувор йўналишларига мувофиқлиги кўрсатилди, илмий янгилик ва амалий натижалар, натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларини апробация қилиш тўғрисидаги маълумотлар ва диссертация иши мавзусида чоп этилган илмий ишлар, шунингдек диссертация таркиби ва ҳажми тўғрисида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Бошқариладиган электр энергетик тизимларининг ўткинчи ҳолатларини таҳлил этишнинг ҳозирги ҳолати**» номли биринчи

бобида мураккаб электр энергетик тизимларининг динамик хусусиятларини тадқиқ этишнинг ҳозирги ҳолати таҳлил этилган. Электр энергетик тизимларининг ўткинчи ҳолатлари ва турғунлигини ўрганиш муаммосига бағишланган диссертация мавзусидаги адабиётларга шарҳ берилган.

Электр тизимининг ўткинчи ҳолатлари энергетик тизимларини лойиҳалашда, ишлаб чиқиш ва ишлашида муҳим рол ўйнайди. Ушбу жараёнларни ўрганиш, умуман олганда машиналар ва энергетик тизимларининг динамик хусусиятлари ҳақида муҳим маълумотларни бериб, тизимда авариялар содир бўлганда уларнинг синхронизмини сақлаб қолиш қобилиятини намоиш этади.

Энергетик тизимларнинг турғунлиги электр энергетик тизимларининг (ЭЭТ) режим параметрлари кўплаб ўзаро боғлиқликларга эга бўлганлиги туфайли инженер-энергетиклар учун катта муаммо ҳисобланади. Ўткинчи ҳолатларни ўрганиш муаммоларидан бири бўлиб, энергетика тизимининг турғунлигини тўғри баҳолаш учун тизимни етарли даражада моделлаштиришдир, бу кўп сонли усуллардан фойдаланган ҳолда ечим олиш учун математик моделларни тўғри шакллантиришни талаб этади.

Электр тизимидаги шикастланишлардан сўнг синхрон генераторларнинг динамик таъсирдан синхрон ишлаш муаммоси юзага келганда, энергетик тизимининг турғунлигига ҳолатнинг кўплаб омиллари ва параметрлари, шу жумладан машина роторининг бурчаги ўзгариши динамикаси таъсир қилади.

Диссертациянинг «**Бошқариладиган электр тизимларни ўрганишнинг матрицавий усулларининг назарий асослари**» номли иккинчи бобида квадратик шаклдаги Ляпунов функциясининг усули, бошқариладиган электр тизимларини таҳлил этиш усули сифатида тизимларни жойлаштириш технологияси, шунингдек канонизация усулига бағишланган. Электр энергетик тизимларининг ўткинчи жараёнларини ўрганишда улар пайдо бўлганда матрицали тадқиқот усуллари қўлланилган. Уларнинг таркиби куйидагиларни ўз ичига олади.

Динамик стационар тизимнинг тенгламалари, бу ҳолда чизикли электр тизими, ҳолат майдонида «кириш - ҳолат - чиқиш» модели учун:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$y = Cx + Du, \quad (2)$$

бу ерда  $x$ ,  $\dot{x}$  - кириш тизимининг ҳолати вектори ва унинг ҳосилалари;  $y$  - чиқиш вектори;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  - объект элементлари ва ўрганилаётган тизим ростлагичи коэффицентларидан ташкил топган функционал доимий матрицалар;  $u$  - кириш ва безовта қилувчи омилларнинг вектори.

(1) ва (2) тенгламаларни оператор шаклида тавсифлашда:

$$px(p) = Ax(p) + Bu(p), \quad (3)$$

$$y(p) = Cx(p) + Du(p).$$

Умумий ҳолатда (3) даги тенгламалар сони уларда пайдо бўладиган ўзгарувчилар сонига тўғри келмайди. Бунинг сабаби шундаки,  $u(p)$  да акс этган ташқи таъсирлар бошқа ўзгарувчиларга боғлиқ эмас

$$R(p) = \begin{bmatrix} pI_n - A & -B \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

шунинг учун (3) га тўғри келадиган Розенброк тизим матрицаси  $((n+m) \times (n+s))$  ўлчамига эга, яъни, тўртбурчаклар шаклида. Натижада, квадрат матрицалар учун мўлжалланган детерминантларни, хусусий қийматларни ва векторларни ҳисоблаш каби анъанавий процедуралар қабул қилинмайди. Ушбу муаммонинг ечимини топиш мақсадида киритиш технологияни ишлаб чиққан рус муаллифлари (М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко) тизимни (3) шаклининг

$$u(p) = u(p), \quad (5)$$

тенгламаси билан тўлдиришни таклиф қилдилар, (3) тенглама билан ифодаланган муаммонинг мазмунига таъсир қилмайдиган тартибга солувчи ростланувчи деб номланган.

Натижада тенгламалар тизимини оламит:

$$\begin{aligned} (pI_n - A)x(p) &= Bu(p), \\ y(p) &= Cx(p) + Du(p), \\ u(p) &= u(p), \end{aligned} \quad (6)$$

ушбу тенгламаларнинг блок-матрицали шаклдаги кўриниши:

$$\begin{bmatrix} pI_n - A & 0_{n \times m} & -B \\ -C & I_m & -D \\ 0_{s \times n} & 0_{s \times m} & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(p) \\ y(p) \\ u(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0_{m \times 1} \\ u(p) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Кейин стационар чизиқли динамик тизимнинг (7) умумлаштирилган тенгламасини қуйидаги шаклда ёзиш мумкин:

$$\Omega(p)Y(p) = U(p), \quad (8)$$

бу ерда

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} pI_n - A & 0_{n \times m} & -B \\ -C & I_m & -D \\ 0_{s \times n} & 0_{s \times m} & I_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

- ўрганилаётган тизим  $(n+m+s) \times (n+m+s)$  ўлчамдаги муаммоли матрицаси (проматрица):

$$Y(p) = \begin{bmatrix} x(p) \\ y(p) \\ u(p) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

- умумлаштирилган тизимнинг чиқишдаги кўрсаткичи,

$$U(p) = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0_{m \times 1} \\ u(p) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

- умумлаштирилган тизимнинг кириши.

Чизиқли стационар тизимни кўриб чиқамиз

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad (12)$$

бу ерда  $A$  – ўрганилаётган тизимнинг коэффициентлар матричаси;  $X$  -  $n$  - ўлчовли вектор – координатали устун  $x^1, x^2, \dots, x^n$ .

Ушбу тизим учун квадратик шаклидаги Ляпунов  $V$  функциясини аниқлаймиз:

$$V = \sum_{i,j=1}^n q_{ij}x_i x_j = X^T Q X; \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad (13)$$

бу ерда  $Q$  - квадратик коэффициентларнинг ҳали номаълум квадрат матричаси;  $X^T$  - транспонирланган  $X$  (вектор-қатор).

$V$  функциясининг ҳосиласи қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{d(x^T Q x)}{dt} = \left( \frac{dx}{dt} \right)^T Q x + x^T Q \left( \frac{dx}{dt} \right) = \\ &= (Ax)^T Q x + x^T Q Ax = x^T A^T Q x + x^T Q Ax = \\ &= x^T (A^T Q + Q A) x. \end{aligned} \quad (14)$$

Квадратик  $V$  функция қуйидаги шартни бажаришини талаб қиламиз:

$$\frac{dV}{dt} = -W, \quad (15)$$

бу ерда  $W = x^T C x$  - ихтиёрий мусбат аниқланган симметрик матрица.

(14) ва (15) ифодаларни тенглаштирсак, квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси тенгламасини оламиз:

$$A^T Q + Q A = -C. \quad (16)$$

Ифодадаги (16) тенглама Ляпунов матрицавий тенгламаси деб аталади. Ифодадаги (16) тенглама ҳар қандай симметрик  $Q$  матричасини  $C$  матричаси билан боғлайди ва аксинча. Ушбу ёзишмалар чизикли. Матрица  $Q$  элементлари (16) дан  $\frac{n(n+1)}{2}$  тенгламаларни ечиш орқали аниқланади, бу ерда  $n$  - тенгламалар сони. Агар мусбат аниқ симметрик матрицани  $C$  ни белгиласак (бу ҳолда (16) дан топилган  $Q$  матричаси ҳам мусбат аниқ бўлиб чиқади), у ҳолда тизимнинг (12) чизиклилиги ва стационарлиги нуқтаи назаридан Ляпунов теоремасига биноан унинг мувозанат ҳолатининг асимптотик турғунлигини оламиз. Бундай ҳолда, турғунлик шартлари Раус - Гурвиц мезонларидан олинган шартларга мутлақо тенг бўлиши керак.

Ўрганилаётган динамик тизимнинг турғунлиги учун  $Q$  матрицанинг бош минорлари мусбатлиги талаб қилинади. Умумий ҳолда  $Q_n > 0$ ,  $\Delta_{li} > 0$ , бу ерда  $n$  - генераторлар сони.

Силвестр теоремасига кўра, кичик турткилар остида ўрганилаётган тизимнинг турғунлиги учун зарур ва етарли шарт  $Q$  матричасининг асосий диагонали минорларининг ижобийлиги бўлиб, масалан, уч генераторли тизим учун қуйидаги шаклга эга:

$$Q_3 = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0, \quad (17)$$

яъни  $\Delta_{L1}=q_{11}>0$ ,  $\Delta_{L2} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{vmatrix} > 0$ ,  $\Delta_{L3} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0$ .

бу ерда  $\Delta_{L1} - \Delta_{L3}$  Q матрицанинг минорлари.

Кириштиш назариясида каср-полином функцияси шаклида ўрганилаётган тизимнинг тасвирини маълум бир функционалдан фойдаланамиз:

$$\omega(p) = f(p) = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad (18)$$

бу ерда  $a(p)$  ва  $b(p)$  полином функциялари, мос равишда, ўрганилаётган тизимнинг математик модели узатиш матрицасининг махражи ва сурати.

Каср-полиноминал матрицаси берилган умумий ҳолат учун тасвир шаклга эга:

$$\omega(p) = F(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \frac{1}{a(p)} [b_{ij}(p)]. \quad (19)$$

Шуни таъкидлаб ўтиш керакли, синтез пайтида керакли динамик тасвир ва статик хусусиятлар тўпламини тавсифлайди ва таҳлил пайтида у лойиҳалаштирилган тизимнинг керакли хусусиятларини тавсифлайди.

Диссертациянинг «**Матрицавий усуллари асосида электр энергетик тизимларининг кичик тебранишларини ўрганиш**» номли учинчи бобида генераторларнинг абсолют бурчакларига асосланган оддий ва мураккаб электр энергетик тизимларининг кичик тебранишларининг математик моделлари шакллантирилди.

Тугунлар кучланиш тенгламаларининг фундаментал усулларини ва квадратик шаклдаги Ляпунов функциясини биргаликда қўллаган ҳолда Ўзбекистон энергетика тизимининг кичик тебранишлари таҳлил этилган. Улар асосида Ўзбекистон энергетик тизимидаги генераторларнинг турғунлик чегараларини ҳисоблаш дастури ишлаб чиқилган.

Турғунлик чегараларини ҳисоблаш дастурини тузишда 1-расмда кўрсатилган алгоритмдан фойдаланилди.

Ушбу алгоритм қуйидагича ишлайди:

- электр тизимининг нормал ҳолатини ҳисоблаш амалга оширилади;
- аperiодик турғунликнинг бузилишини истисно қилиш учун олинган Якоби матрицаси детерминантининг белгиси таҳлил этилади;
- квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси ҳосил бўлади ва Силвестр мезонига кўра Q мусбат аниқ функциянинг минорлари (асосий диагонал бўйлаб) белгиси текширилади;

- режимни оғирлаштириш амалга оширилади, яъни Q матрицанинг асосий минорлари ўз ишорасини ўзгартирмагунча, статик турғунликнинг бузилиш

чегарасигача бир ёки бир нечта юклагачи тугунларда қувват секин-аста ошириб борилади.

- алгоритмни яқинлаш ҳамда бурчак ва кучланиш қийматлари бўйича натижаларни чиқариш, шунингдек, турғунлик чегарасига биринчи навбатда яқинловчи генераторни аниқлаш.

Нормал ҳолатни ҳисоблаш учун дастлабки маълумотлар сифатида қуйидагилар ишлатилган: Ўзбекистон энергетик тизимининг эквивалент схемасининг топологияси; қувват тизими диаграммаси элементларининг параметрлари; генерация ва истеъмол даражалари.

Дастурий маҳсулотнинг функционалиги қуйидагиларни ўз ичига олади.

- ҳар қандай мураккаблик ва конфигурациядаги электр тизимлари учун маълумотларни киритиш имконияти;

-  $P-V$  ва  $P-Q$  тугунлари учун маълумот киритишга имкон беради;

- ишлаб чиқарувчи блокларда реактив қувватнинг минимал ва максимал қийматларини белгилаш қобилияти;

- натижаларни кейинги чиқиши билан нормал ҳолатни ҳисоблаш;

- генерацияловчи тугунлар учун квадратик шаклдаги Ляпунов функция матрицасининг бош минорида ўзгариш характеристикаларини қуриш;

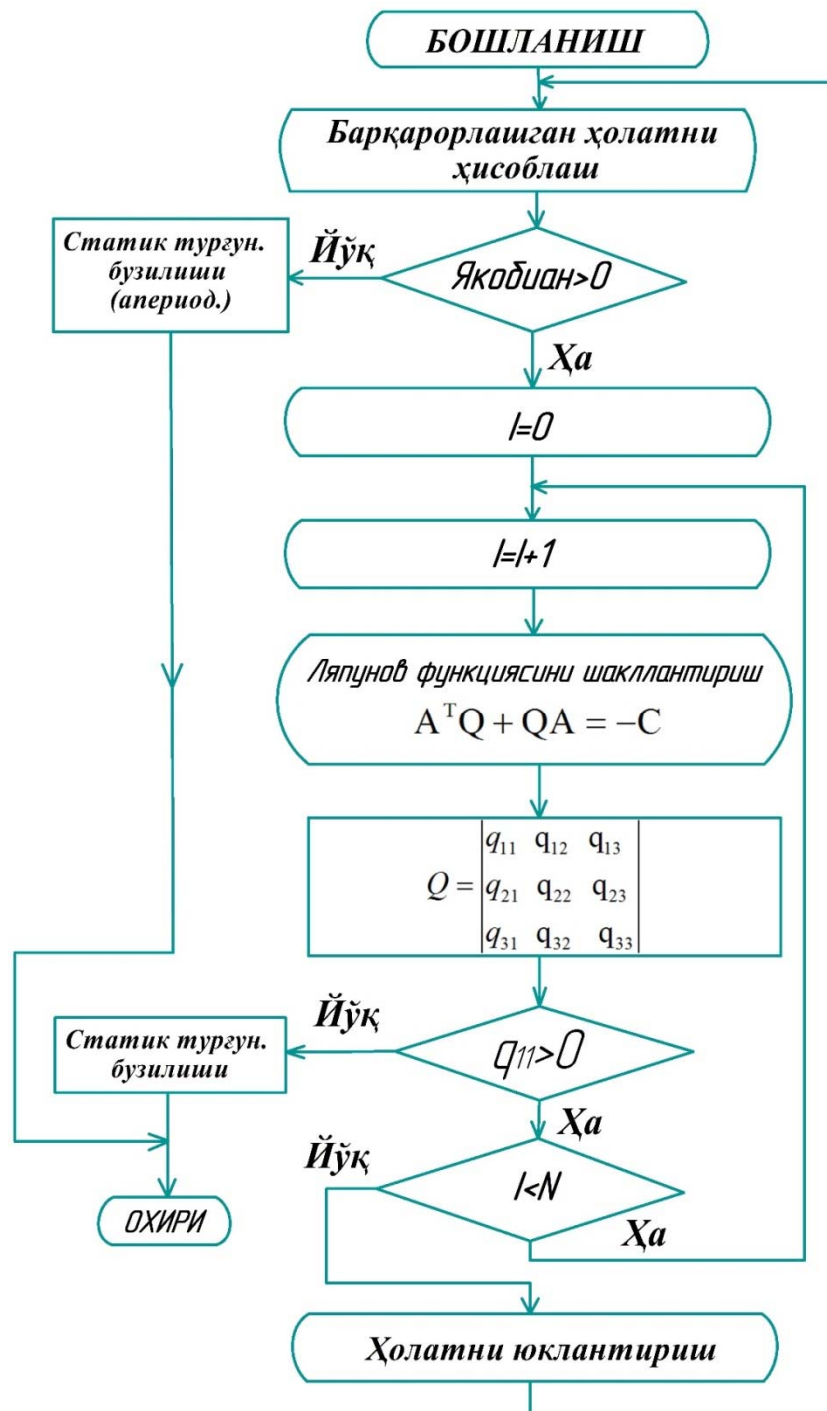
- барча ҳосил қилувчи тугунлар учун турғунлик чегараларини аниқлаш ва турғунлик чегарасига биринчи бўлиб яқинлашадиган тугунни топиш.

Ўзбекистон энергетик тизимининг схемаси мисолида барқарор ҳолат ва турғунлик ҳисоби амалга оширилди. Энергетик тизимининг эквивалент схемасида жами 105 та тугун мавжуд бўлиб, шулардан 22 таси генерацияловчи тугунларни ҳосил қилади. Ўрганилган схема бўйича Ўзбекистон энергетика тизимининг Миллий диспетчерлик маркази томонидан энергия ишлаб чиқариш ва истеъмол қилиш даражасини аниқ ўлчаш натижалари кўрсатилган. Ҳақиқий ўлчов ва кузатиш маълумотлари 2018 йил 20-июнга тўғри келади, ҳамда улар кечки максимум соатларда (21:00) олинган.

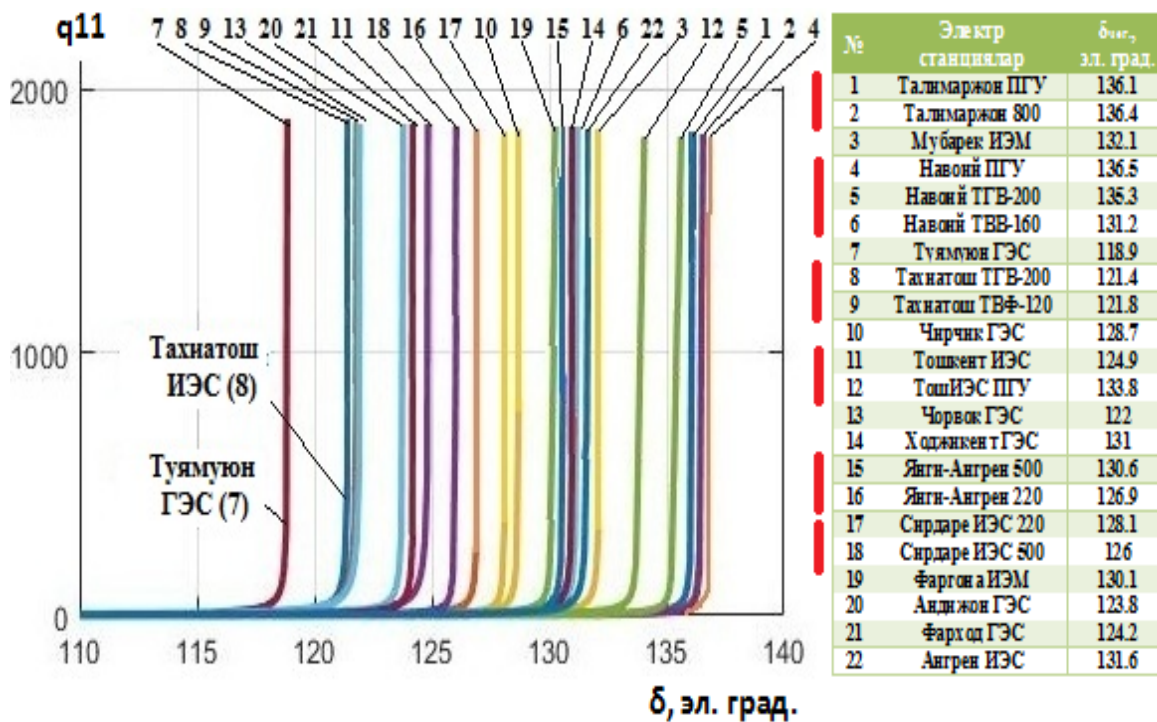
2-расмда квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси  $Q$  матрицасининг биринчи диагональ минорларининг ўзгариши хусусиятлари, шунингдек энергетик тизимининг ҳар бир тугуни учун турғунлик чегаралари кўрсатилган. Бундай ҳолатда  $q_{11} > 0$  мезонидан фойдаланилган, яъни, Ляпунов матрицавий тенгламасидаги  $Q$  матрицасининг биринчи бош минори мусбат қийматга эга бўлиши.

1-расмда кўрсатилган алгоритмга мувофиқ энергетик тизимининг Жанубий-Ғарбий ва Шимолий-Ғарбий қисмларидаги юклага,  $q_{11}$  ўз белгисини манфийга ўзгартиргунча қадар, аста-секинлик билан оширилди.

Келтирилган тавсифларга кўра, энергетика тизимининг 7 ва 8 позицияларида жойлашган генераторлар (Туямуюн ГЭС, Тахиатош ИЭС) турғунлик чегарасига биринчи бўлиб яқинлашмоқда ва уларнинг чегаравий бурчаклари Туямуюн ГЭСдаги генераторлар учун 118,9 эл. градусни ва Тахиатош ИЭС генераторлари учун 121,4 эл. градусни ташкил этди. Нормал ҳолатда ўрнатилган қуввати 730 МВт бўлган Тахиатош ИЭС генераторлари 420 МВт юклага билан ишлаётган эди. Ўрнатилган қуввати 150 МВт бўлган Туямуюн ГЭС генераторлари 34 МВт юклага билан ишлаётган эди.



1-расм. Квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси усули бўйича кичик тебранишларни ўрганиш алгоритми.



**2-расм. Квадратик шаклдаги Ляпунов функциясининг Q матричасининг биринчи диагонали минорларнинг ўзгаришларнинг хусусиятлари.**

Ушбу маълумот асосида, ЭЭТ диспетчерлари ҳолат ва турғунликни тартибга солиш тўғрисида қарорни қабул қилишади.

Диссертациянинг «Синхрон генераторларнинг қўзғатишини автоматик бошқариш тизимларининг параметрларини соzлашнинг аналитик синтези» номли тўртинчи бобида тартибга солинадиган электр энергетик тизимининг математик модели кутбларини бошқариш усулларини ўрганайди. Электр тизимининг ростлаш матричаси аниқланди ва Ўзбекистон энергетик тизимининг модели статик ва динамик турғунлиги текширилди.

Тошкент давлат техника университети «Электр станциялари, тармоқлари ва тизимлари» кафедрасида умумий шаклда синхрон генераторларнинг қўзғатиш ростлагичлари коэффициентлари матричаси кўринишидаги замонавий ростлагичнинг математик модели ишлаб чиқилган ва таклиф қилинган:

$$K = \begin{bmatrix} k_{Eq1}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eq1}^{\Delta\delta_n} & k_{Eq1}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eq1}^{\Delta s_n} \\ k_{Eq2}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eq2}^{\Delta\delta_n} & k_{Eq2}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eq2}^{\Delta s_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{Eqn}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eqn}^{\Delta\delta_n} & k_{Eqn}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eqn}^{\Delta s_n} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

бу ерда  $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_j}$  - i-генераторнинг автоматик қўзғатиш ростлагичининг кучайтириш коэффициентлари, ва  $i, j=1-n$ . (20) матрицанинг катталиги  $n \times 2n$ .

Агар  $i=j$  бўлса, у ҳолда ўз-ўзини ростлаш, агар  $i \neq j$  бўлса, ўзаро ростлаш амалга оширилади. Шубҳасиз, мураккаб ЭЭТда ўзаро ростлаши одатда



қўлланилмайди, шунинг учун  $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_j} = 0$ , чунки  $i \neq j$ . Бу ерда  $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_i}$  -  $i$ -чи генераторнинг абсолют бурчакнинг оғиши бўйича ҚАР каналидаги кучайтириш коэффициенти, ва шунга мос равишда,  $k_{E_{qi}}^{\Delta s_i}$  - ушбу генераторнинг сирпаниш оғиши бўйича коэффициент.

Бу ерда дастлабки тизим модели декомпозиция усулига асосланган ҳолда мураккаб электр энергетик тизимининг қутбларини тўлиқ жойлаштиришининг самарали усули келтирилган.

ММО (3) тизимининг қуйидаги кўп даражали декомпозицияси матрицалар жуфтлиги  $(A, B)$  билан, бу ерда  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times r}$  киритилган.

3-расмда ростлагичнинг синтези алгоритми берилган бўлиб, у берилган қутбнинг жойлашишини таъминлайди. Алгоритмнинг кетма-кетлиги қуйидагича:

- $A_0 = A$ ,  $B_0 = B$  матрицалар киритилади;
- $L = \text{ceil}(n/r) - 1$  ҳисобланади;
- тизимнинг керакли қутбларнинг матрицалари  $\Phi = \Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_L$

киритилади, шундай қилиб  $\bigcup_{i=1}^{L+1} \text{eig}(\Phi_i - 1)$  - ёпик тизимнинг керакли спектри;

- ортогонал аннулятори  $B_0^\perp = B^\perp$ , ва ундан кейин  $A_1 = B^\perp A B^{\perp T}$ ,  $B_1 = B^\perp A B$  ... матрицалар аниқланади;

- ортогонал аннулятори  $B_f^\perp$ , ва ундан кейин  $A_{f+1} = B_f^\perp A_f B_f^{\perp T}$ ,  $B_{f+1} = B_f^\perp A_f B_f$  ... матрицалар аниқланади;

- ортогонал аннулятори  $B_{L-2}^\perp$ , ва ундан кейин  $A_{L-1} = B_{L-2}^\perp A_{L-2} B_{L-2}^{\perp T}$ ,  $B_{L-1} = B_{L-2}^\perp A_{L-2} B_{L-2}$  .матрицалар аниқланади;

- ортогонал аннулятори  $B_{L-1}^\perp$ , ва ундан кейин  $A_L = B_{L-1}^\perp A_{L-2} B_{L-1}^{\perp T}$ ,  $B_L = B_{L-1}^\perp A_{L-1} B_{L-1}$  .матрицалар аниқланади;

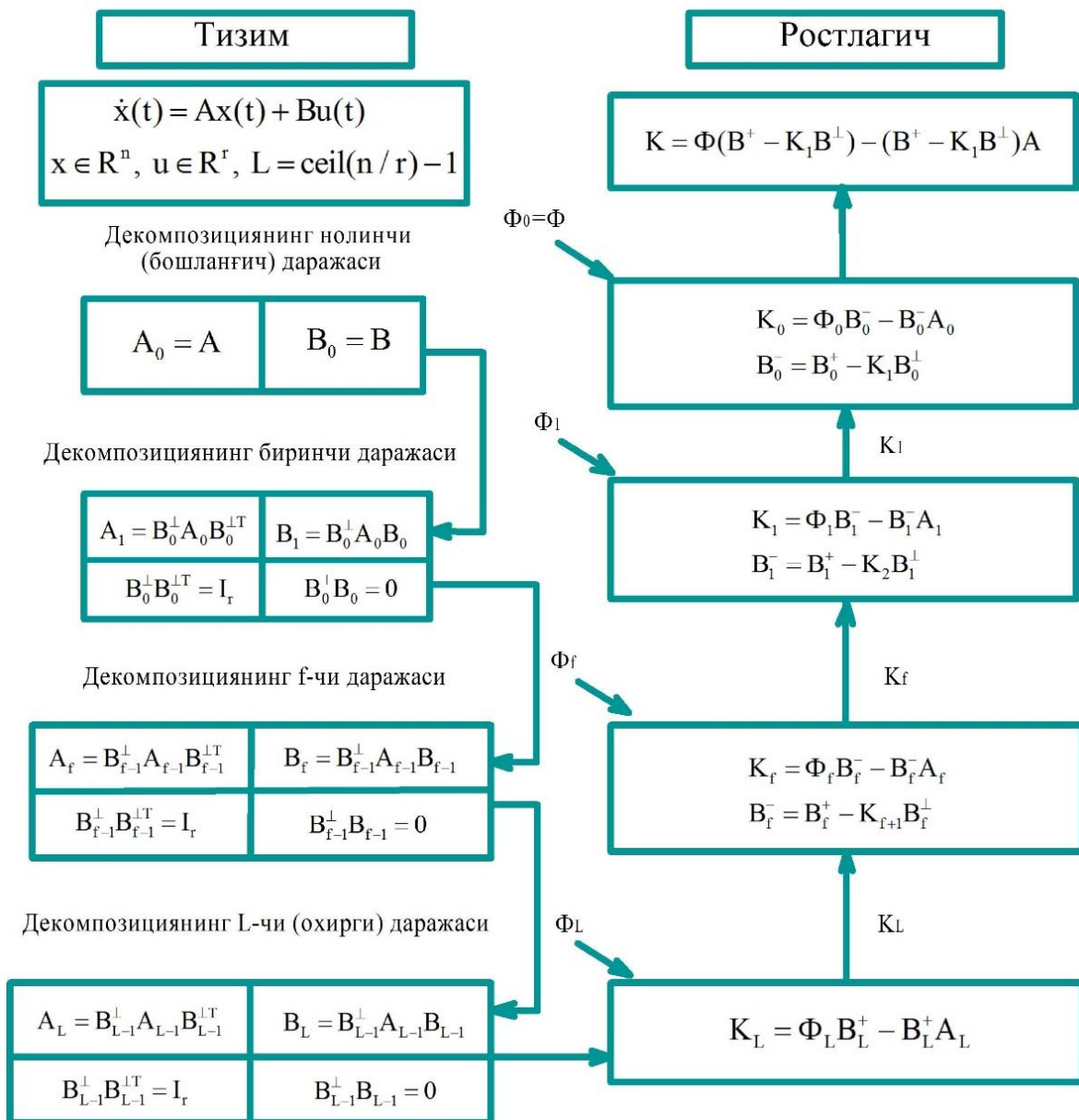
- матрицалар кетма-кет ҳисоблаб чиқилади

$$K_L = \Phi_L B_L^- - B_L^- A_L,$$

$$B_{L-1}^- = B_{L+1}^+ - K_L B_{L-1}^\perp, \quad K_{L-1} = \Phi_{L-1} B_{L-1}^- - B_{L-1}^- A_{L-1}, \dots,$$

$$B_1^- = B_1^+ - K_2 B_1^\perp, \quad K_1 = \Phi_1 B_1^- - B_1^- A_1,$$

$$B_0^- = B_0^+ - K_1 B_0^\perp, \quad K_0 = \Phi_0 B_0^- - B_0^- A_0.$$



**3-расм. Тизим қутбларини тўлиқ жойлаштириш алгоритми.**

Бу ерда  $\perp$  белги билан матрицавий нол бўлинувчилар деб аталган;  
 $B^+$  – Мур-Пенроуз псевдоматрицаси.

4-расмда энергетик тизимининг асосий генерацияловчи ва юклама қувватлари кўрсатилган.

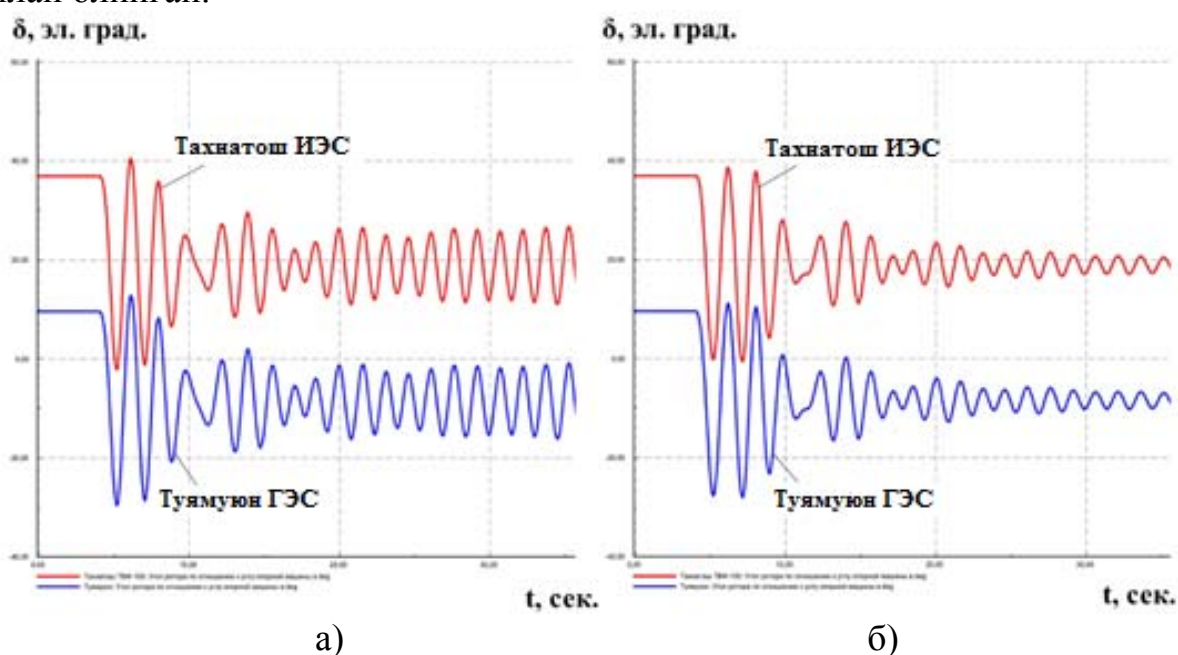
Энергетик тизимининг генерацияловчи блоклари турғунлиги чегараларининг олинган натижаларининг адекват деб тасдиқлаш учун (2-расм) ва ЭЭТнинг динамик хусусиятларини таҳлил этиш учун DIGSilent PowerFactory дастурий мажмуасида электр тизимининг виртуал симуляцияси ўтказилди.

Барқарор ҳолатда, яъни ҳолатни оғирлаштиришдан олдин Ўзбекистон энергетика тизимининг Марказий қисмидан Жануби-Ғарбий қисми томонга қувват оқими 659,7 МВт ни ташкил этган эди.



Юкламани босқичма-босқич ошириб боришдан иборат бўлган ҳолатнинг оғирлаштириш жараёни орқали кичик турткиларни симуляция қиламиз. Энергетик тизимининг схемасини шартли равишда зоналарга ажратамиз. Электр тизимининг Шимолий-Ғарбий ва Жанубий-Ғарбий қисмларидаги юкламани турғунликни бузадиган даражага қадар аста-секин ошириб борамиз. Оғирлаштириш жараёни натижасида Ўзбекистон энергетика Марказий қисмдан Жанубий-Ғарбий қисмга энергия оқими 1407 МВт ни ташкил этди.

5-расмда Туямуюн ГЭС ва Тахиатош ИЭС генераторларининг юкланиш бурчакларидаги синхрон машиналарнинг демпфер коэффициентлари ва синхрон генераторларнинг автоматик кўзғатиш ростлагичи иштирокидаги хусусиятлар кўрсатилган. Тавсифлар Ўзбекистон энергетика тизимининг Шимолий-Ғарбий ва Жанубий-Ғарбий қисмларида юкнинг аста-секин ўсиши билан олинган.



**5-расм. Ҳолатнинг оғирлаштириш жараёнидаги юкланиш бурчакларидаги ўзгаришларнинг хусусиятлари:** а) ростлагичнинг базовий созламалари; б) ростлагич учун тавсия этилган созламалар.

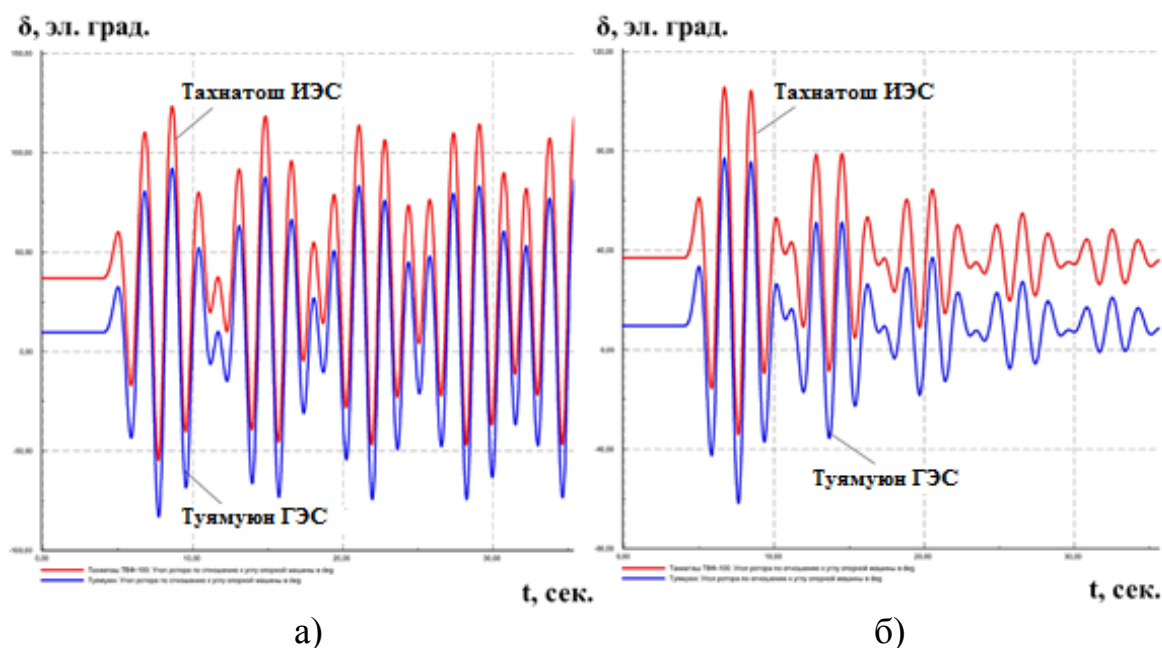
Юклама ортишидан сўнг генераторларнинг юкланиш бурчакларидаги сезиларли тебранишлар кузатилади ва вақт ўтиши мобайнида бурчаклар доимий равишда ошиб борди. Юкланиш бурчакларининг ошиши натижасида Туямуюн ГЭС ва Тахиатош ИЭС генераторларида ўз-ўзидан чайқалиш содир бўлди. (5-расм, а). Турғунлик бузилган.

5, б-расмда тавсия этилган (20) ростлагични ҳисобга олган ҳолда синхрон машиналарнинг юкланиш бурчакларини ўзгариши тавсифлари кўрсатилган. Ўткинчи жараён тебранувчи характерга эга бўлиб, тебранишларнинг сўниш вақти 20 сонияни ташкил этди, ва натижада турғунлик сақланиб қолинди.

Навбатдаги ҳолатда, катта турткилар юз берганда электр тизимининг динамик хусусиятларини таҳлил этилиши амалга оширилади. Талимаржон-

Қорақўл 500 кВ ҳаво йўлининг 100-километрида - икки фазали ерга қисқа туташув шаклида катта турткиларни келтирамиз.

Қисқа туташув давомийлиги - 0,12 сония. Шундан сўнг, релели ҳимояси ёрдамида линия узилади. 0,2 сониядан сўнг уч фазали автоматик қайта улаш (АҚУ) ишлайди ва натижада ҳаво электр узатиш тармоғини қайта қўшади. Аммо тажрибада мазкур ҳаво электр узатиш тармоғи мавжуд бўлган қисқа туташувга уланганлиги сабабли автоматик равишда қайта қўшиш муваффақиятсиз амалга ошади. 0,12 сония вақт ўтишидан сўнг тизим релели ҳимояси ва автоматикаси ишлаши натижасида ҳаво электр узатиш тармоғи тармоқдан узилади ва 0,2 сония вақтдан сўнг АҚУ иккинчи маротаба ишлайди. АҚУ иккинчи маротаба муваффақиятли бўлгандан сўнг, қисқа туташув бартараф этилади ва линияда оқими тикланади.



**6-расм. Икки фазали ерга қисқа туташув пайтида юкланиш бурчакларидаги ўзгаришларнинг хусусиятлари:** а) ростлагичнинг базовий созуламалари; б) ростлагич учун тавсия этилган созуламалар.

6-расмда келтирилган тавсифларга асосан, кўриниб турибдики қисқа туташув натижасида Тахиатош ИЭС ва Туямуюн ГЭС генераторларининг юкланиш бурчакларида сезиларли тебранишлар юз берди. Турғунлик бузилган.

6, б-расмда икки фазали ерга қисқа туташув пайтида юкланиш бурчакларидаги ўзгаришларнинг хусусиятлари кўрсатилган. Қисқа туташув содир бўлганда, генераторларнинг бурчакларининг тебранишлари кузатилди, аммо жараён сўнувчи хусусиятга эга бўлиб, ўткинчи жараённинг максимал сўниш вақти тахминан 40 секундни ташкил этди. Вужудга келган тебранишларнинг амплитудаси ҳамда уларнинг сўнишига кўра ҚАР тизимларининг муваффақиятли ишлашини кўрсатди. Синхрон генераторлардаги ҚАР нинг тартибга солинадиган қонуни (20) натижасида турғунлик сақланиб қолади.

## ХУЛОСА

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация мавзуси «Бошқариладиган электр тизимлари ўткинчи ҳолатларини таҳлил этиш усуллари ва алгоритмлари» илмий ишининг тадқиқот натижалари асосида куйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Дастурий амалга ошириш ва ҳолатнинг турли хил параметрларининг ўзаро таъсирини ҳамда туртки турларини ҳисобга олиш нуқтаи назаридан ЭЭТ ҳолатларини, шу жумладан ўткинчи ҳолатларини тадқиқ этишда матрицали усуллар самарали ҳисобланади. Юқорида келтирилган усулларни қўллаш натижасида электр тизимларини бошқариш имконияти яхшиланади.

2. Синхрон генераторларнинг абсолют бурчакларига нисбатан электр энергетик тизимларининг математик моделлари ишлаб чиқилган, шунингдек синхрон генераторларнинг қўзғатишини автоматик ростлаш моделлари олинган.

3. Фундаментал усуллар - тугун кучланишлари тенламалари ва квадратик шаклдаги Ляпунов функциясини биргаликда қўллаш асосида ҳар қандай мураккабликдаги ЭЭТ турғунлигини тадқиқ этиш учун дастур ишлаб чиқилди. Натижада турғунлик чегарасига биринчи бўлиб яқинлашувчи энергетик тизим генераторларини аниқлаш имконияти яратилди ( $\Delta_{11}=q_{11}>0$ ,  $\frac{dq_{11}}{d\Pi} > 0$ ).

4. Турли хил турткилардан ЭЭТнинг динамик хусусиятини яхшиловчи ва турғунлик захирасини ошириш имкониятини берувчи синхрон генераторнинг қўзғатишини бошқарувчи математик модел ишлаб чиқилди ва бошқариш қонуни таклиф этилди.

5. Бошқарилувчи мураккаб электр энергетик тизимнинг турғунлик захираларини ошириш учун, кутбларни мос ҳолда силжитиш имконини берадиган, матрицалар декомпозицияси ва канонизациясига асосланган услуб ишлаб чиқилди.

6. Синхрон генераторларнинг қўзғатишини бошқариш учун таклиф этилган қонун ва ишлаб чиқилган дастурларни қўллаш натижасида жами 150545,7 минг сум иқтисодий самарадорлик олинди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МАХМУДОВ ТОХИР ФАРХАДОВИЧ**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ  
РЕЖИМОВ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**05.05.02 – Электротехника. Электроэнергетические станции, системы.  
Электротехнические комплексы и установки**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

**Ташкент-2020**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2019.2. PhD/Т602.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный руководитель:**

**Аллаев Кахраман Рахимович**  
доктор технических наук, профессор,  
академик

**Официальные оппоненты:**

**Пирматов Нурали Бердиярович**  
доктор технических наук, профессор

**Садуллаев Насулло Нематович**  
доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:**

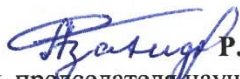
**АО «Теплоэлектропроект»**


Защита диссертации состоится «25» каебр 2020 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/10.12.2019.T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел./факс: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).


С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - 173). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2 Тел.: (99871) 227-03-41.

Автореферат диссертации разослан «13» каебр 2020 года.  
(протокол реестра № «9» от «13» каебр 2020 г.).



  
**Р.А. Захидов**  
Заместитель председателя научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
доктор технических наук, профессор, академик

  
**О.Х. Ишназаров**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник

  
**М.И. Ибадуллаев**  
Председатель научного семинара при  
научном совете по присуждению ученых  
степеней, доктор технических наук, профессор



## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире особое внимание уделяется определению запасов устойчивости электрических систем в связи с высокими темпами роста спроса на электроэнергию. По этой причине, «для бесперебойного электроснабжения потребителей необходимо прежде всего обеспечить стабильную работу энергосистем»<sup>1</sup>. При этом такие вопросы, как эффективный анализ переходных режимов и управление ими, улучшение эксплуатационных режимных характеристик энергосистемы являются важнейшими. В этом отношении особое внимание уделяется исследованиям, направленным на повышение устойчивости и динамических свойств электроэнергетических систем, в том числе за счет использования современных методик расчета и интеллектуальных устройств управления.

В мире проводятся исследования по методам построения самонастраивающихся систем автоматического управления, систем управления на основе нейро-нечетких моделей, алгоритмов и методов исследования устойчивости сложных электроэнергетических систем, а также программных комплексов для решения задач автоматизации энергетических объектов. В этом направлении, во-первых, быстро развиваются цифровые вычислительные технологии, что привело к резкому увеличению производительности аппаратного и программного обеспечения. Вместе с этим, во-вторых, использование передающих технологий, таких как HVDC и FACTS, в последних дало новые возможности в энергетической системе, такие как использование новых методов управления, увеличение пропускной способности электрических сетей для передачи мощности и мониторинга. применение технологий передачи HVDC и FACTS добавили новые методы контроля в энергосистеме, увеличили пропускную способность электрических сетей и улучшили возможности мониторинга. В этой связи сложность электрических систем, их динамика и одновременное взаимодействие внешних факторов для обеспечения правильного планирования и проектирования относятся к числу актуальных задач.

В нашей республике большое внимание уделяется устойчивому развитию энергетической отрасли. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы поставлена задача «...сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии, повышение производительности труда в отраслях экономики...»<sup>2</sup>. Одной из актуальных проблем в выполнении указанных задач является разработка алгоритмов и программ по исследованию переходных режимов сложных управляемых электроэнергетических систем, основанных на матричных методах.

---

<sup>1</sup> <http://www.sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/article/state-problem/>

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента №ПП-3981 от 23 октября 2018 г. «О мерах по ускоренному развитию и обеспечению финансовой устойчивости электроэнергетической отрасли» и №ПП-2559 от 15 июля 2016 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию научно-технической деятельности в сфере электроэнергетики», Закона Республики Узбекистан «Об электроэнергетике» от 30 сентября 2009 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере.

**Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан II. «Энергетика, энерго-и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования, направленные на решение актуальных задач по разработке эффективных алгоритмов исследования переходных режимов электрических систем, осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира. В том числе в Национальном исследовательском университете (МЭИ, Россия), Научно-исследовательском институте по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ, Россия), Ивановском государственном энергетическом университете (Россия), Санкт-Петербургском государственном техническом университете (Россия), Massachusetts Institute of Technology (MIT, США), California Institute of Technology (США), National University of Singapore (NUS, Сингапур), Delft University of Technology (Нидерланды), Seoul National University (Южная Корея), Ташкентском государственном техническом университете, ООО «Научно-техническом центре» и ООО «Энергоцентре» (Узбекистан) и др.

В решении научных проблем анализа переходных режимов и устойчивости регулируемых электрических систем, а также в развитие теории устойчивости и управления систем, в том числе в развитие автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) внесли большой вклад известные зарубежные ученые, такие как Горев А.А., Жданов П.С., Веников В.А., Мисриханов М.Ш., Зеккель, Совалов С.А., Литкенс И.В., Васин В.П., Андреюк В.А., Андерсон П. (Anderson P.), Фуад А. (Fouad A.), Кундур П. (Kundur P.), Байерс Р. (Byers R.), Гонен Тюран (Gonen Turan), а также отечественные ученые Фазылов Х.Ф., Абдуллаев Д.А., Насиров Т.Х., Аллаев К.Р., Гайибов Т.Ш., Мирзабаев А.М. и др.

Несмотря на значительные достижения недостаточно изученными остаются проблемы исследования переходных режимов управляемых сложных электроэнергетических систем, а также выбора настроечных параметров систем автоматического регулирования возбуждением синхронных генераторов, взаимовлияние различных режимных факторов как в нормальных, так и в аварийных режимах.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета на тему ОТ-Атех-2018-(517+513+362) «Интеграция фотоэлектрических систем в центральную электрическую сеть» (2018-2020 гг.).

**Цель исследования** состоит в разработке методов, алгоритмов и программных средств управления на основе усовершенствованных законов формирования автоматических регуляторов возбуждения.

**Задачи исследования:**

анализ современных методов и алгоритмов исследования устойчивости сложных электрических систем;

разработка матричной математической модели многомашинной электроэнергетической системы в рамках позиционной модели и с учетом абсолютных углов синхронных машин;

разработка алгоритмов анализа статической устойчивости электрических систем с использованием матричных методов;

разработка методики, основанной на методе декомпозиции и канонизации матриц, позволяющей осуществлять перемещение полюсов электрических систем с целью увеличения запасов устойчивости;

разработка математической модели и алгоритмов расчета настроечных параметров систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов на основе матричных методов.

**Объектом исследования** являются сложные электроэнергетические системы с учетом автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы анализа переходных режимов электроэнергетических систем, методы расчета настроечных параметров систем автоматических регуляторов возбуждения.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теории устойчивости электрических систем, установившихся режимов ЭЭС, функция Ляпунова в квадратичной форме, а также метод декомпозиции на основе современной теории матриц.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана матричная математическая модель сложной электроэнергетической системы относительно абсолютных углов синхронных генераторов;

разработан метод и программа для определения генератора (станции) сложной электрической системы, первым приближающимся к пределу устойчивости;

усовершенствованы методы обеспечения устойчивости электроэнергетических систем путем перемещения полюсов матричной передаточной функции математической модели электроэнергетической системы;

разработана матричная математическая модель регулятора возбуждения и программа по определению параметров и коэффициентов матрицы регулятора, автоматических регуляторов возбуждения синхронных машин;

создан алгоритм и программа, основанная на методе декомпозиции и канонизации матриц, позволяющая осуществлять перемещение полюсов электрических систем с целью увеличения запасов устойчивости.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны алгоритмы расчетов переходных режимов сложных электрических систем, основанные на учете абсолютного угла синхронных генераторов, которые рекомендуются применять в диспетчерских службах ЭЭС;

разработаны алгоритмы и программы по повышению запаса устойчивости электрических систем, позволяющие провести многовариантные расчеты при проектировании энергосистем;

разработан эффективный алгоритм и программа по применению технологии вложения систем для исследования малых колебаний регулируемых электрических систем, углубляющий основы анализа малых колебаний электрических систем;

с целью улучшения демпфирующих свойств электрических систем созданы алгоритм и программа по полному размещению полюсов передаточной функции исследуемой системы.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается применением проверенных на практике математических методов теории устойчивости электрических систем, фундаментальных методов уравнения узловых напряжений и функций Ляпунова в квадратичной форме, и многочисленными экспериментальными расчетами с использованием современных средств и методик, базирующиеся на современной теории матриц.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость полученных результатов в процессе исследований заключается в возможности углубленного исследования статической устойчивости сложных электроэнергетических систем с учетом всех видов нарушения устойчивости: апериодического нарушения, самораскачивания, самовозбуждения одним методом.

Практическая значимость заключается в возможности применения разработанных алгоритмов и программ в практике диспетчерского управления с целью определения устойчивости энергосистем, генераторов первыми приближающимися к пределу устойчивости.

**Внедрение результатов исследования.** На основании полученных научных результатов по предварительному определению пределов устойчивости генерирующих блоков энергосистемы Узбекистана и генераторов, приближающихся к этому пределу:

внедрена методика определения ущерба, причиненного повреждениями при эксплуатации энергетического оборудования в Главном управлении системных услуг (справка АО «Национальные электрические сети

Узбекистана» от 17 сентября 2020 года № 01-02-06/3237). В результате с помощью разработанной методики удалось получить экономический эффект в размере 150 545,7 тыс. сум.

внедрены алгоритм и программа по определению пределов устойчивости регулируемых электрических систем в Главном управлении системных услуг (справка АО «Национальные электрические сети Узбекистана» от 17 сентября 2020 года № 01-02-06/3237). В результате были выявлены генерирующие узлы с наименьшими запасами устойчивости: Туямуюнская ГЭС - граничный угол 118,9 эл. град.; Тахиаташская ТЭС - граничный угол 121,4 эл. град.

внедрены разработанные методы и алгоритмы исследования динамических свойств электроэнергетических систем и систем их управления в Главном управлении системных услуг (справка АО «Национальные электрические сети Узбекистана» от 17 сентября 2020 года № 01-02-06/3237). В результате время затухания переходных процессов, возникающих в электроэнергетических системах в результате малых и больших возмущений, было сокращено до 10 секунд.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования прошли апробацию на 18-ти международных и 2-х республиканских научно-технических и научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 44 научных работ. Из них 11 научных статей, в том числе 3 в республиканских и 8 (2 Scopus) в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Вместе с этим имеется 5 свидетельств на компьютерные программы, выданные Агентством по интеллектуальной собственности Узбекистана.

**Структура и объем диссертации.** Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 153 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** приводится обоснование актуальности диссертационного исследования, формулируются цели и задачи исследований, приводятся объект и предмет исследований, показано соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, излагаются научная новизна и практические результаты, теоретическая и прикладная значимость результатов, сведения об апробации результатов исследований и опубликованных научных трудах по теме диссертационной работы, а также сведения о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации **«Современное состояние анализа переходных режимов управляемых электроэнергетических систем»** проанализировано современное состояние исследований динамических свойств сложных электроэнергетических систем. Приведен обзор литературы

по теме диссертации, посвященных проблеме исследования переходных режимов и устойчивости электроэнергетических систем.

Переходные режимы электрических систем играют важную роль в проектировании, разработке и эксплуатации энергосистем. Исследования этих явлений дает важную информацию о динамических свойствах машин и энергосистем в целом, демонстрируя способность поддерживать их синхронизм при возникновении возмущений в системе.

Устойчивость энергосистем является значительной проблемой для инженеров-энергетиков из-за больших взаимосвязей параметров режима электроэнергетических систем (ЭЭС). Одной из проблем изучения переходных режимов является адекватное моделирование системы для правильной оценки устойчивости энергосистемы, которая требует правильного составления математических моделей для получения решения с помощью численных методов.

Проблема синхронной работы возникает в результате динамического отклика синхронных генераторов после возникновения возмущения в электрической системе. На устойчивость энергосистемы в данном случае влияет множество факторов и параметров режима, в том числе динамика изменения угла ротора машины.

Вторая глава диссертации «**Теоретические основы матричных методов исследования управляемых электрических систем**» посвящена методу функции Ляпунова в квадратичной форме, технологии вложения систем как метода анализа регулируемых электрических систем, а также методу канонизации. При исследовании переходных процессов электроэнергетических систем при их возникновении использованы матричные методы исследования. Содержание которых заключается в следующем.

Уравнения динамической стационарной системы, в данном случае линеаризованной электрической системы, в пространстве состояния для модели «вход - состояние - выход» имеют вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$y = Cx + Du, \quad (2)$$

где  $x$ ,  $\dot{x}$  - входной вектор состояния системы и его производные;  $y$  - выходной вектор;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  - функциональные постоянные матрицы, составленные из коэффициентов элементов объекта и регулятора исследуемой системы;  $u$  - вектор входных и возмущающих факторов.

В случае описания уравнений (1) и (2) в операторной форме записи:

$$\begin{aligned} p x(p) &= A x(p) + B u(p), \\ y(p) &= C x(p) + D u(p). \end{aligned} \quad (3)$$

В общем случае количество уравнений в (3) не совпадает с числом фигурирующих в них переменных. Это связано с тем, что внешние воздействия, отраженные в  $u(p)$ , не зависят от других переменных, поэтому системная матрица Розенброка

$$R(p) = \begin{bmatrix} pI_n - A & -B \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

соответствующая (3), имеет размер  $((n+m) \times (n+s))$ , т.е. является прямоугольной. Как следствие, традиционные процедуры, такие как вычисления определителей, собственных значений и векторов, предназначенных для квадратных матриц, в данном случае неприемлемы. Для преодоления этого препятствия, российскими авторами (М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко), разработавшими теорию вложения предложено систему (3) дополнить уравнением вида:

$$u(p) = u(p), \quad (5)$$

названного регуляризирующим тождеством, не влияющим на содержание задачи, представленный уравнением (3).

В результате получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} (pI_n - A)x(p) &= Bu(p), \\ y(p) &= Cx(p) + Du(p), \\ u(p) &= u(p), \end{aligned} \quad (6)$$

в блочно-матричном виде представляемую в виде:

$$\begin{bmatrix} pI_n - A & 0_{n \times m} & -B \\ -C & I_m & -D \\ 0_{s \times n} & 0_{s \times m} & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(p) \\ y(p) \\ u(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0_{m \times 1} \\ u(p) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Тогда обобщенное уравнение стационарной линейной динамической системы (7) можно написать в виде:

$$\Omega(p)Y(p) = U(p), \quad (8)$$

где

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} pI_n - A & 0_{n \times m} & -B \\ -C & I_m & -D \\ 0_{s \times n} & 0_{s \times m} & I_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

- проблемная матрица (проматрица) размера  $(n+m+s) \times (n+m+s)$ , исследуемой системы:

$$Y(p) = \begin{bmatrix} x(p) \\ y(p) \\ u(p) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

- обобщенный выход системы,

$$U(p) = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0_{m \times 1} \\ u(p) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

- обобщенный вход системы.

Рассмотрим линейную стационарную систему

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad (12)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов исследуемой системы;  $X$  -  $n$  - мерный вектор – столбец с координатами  $x^1, x^2, \dots, x^n$ .

Определим для этой системы функцию Ляпунова  $V$  в квадратичной форме:

$$V = \sum_{i,j=1}^n q_{ij}x_i x_j = X^T Q X; \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad (13)$$

здесь  $Q$  - пока неизвестная квадратная матрица коэффициентов квадратичной формы;  $X^T$  - транспонированный  $X$  (вектор-строка).

Производная функции  $V$  будет определяться из выражения:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{d(x^T Q x)}{dt} = \left( \frac{dx}{dt} \right)^T Q x + x^T Q \left( \frac{dx}{dt} \right) = \\ &= (Ax)^T Q x + x^T Q Ax = x^T A^T Q x + x^T Q Ax = \\ &= x^T (A^T Q + Q A) x. \end{aligned} \quad (14)$$

Потребуем, чтобы квадратичная функция  $V$  удовлетворяла условию:

$$\frac{dV}{dt} = -W, \quad (15)$$

где  $W = x^T C x$  - произвольная положительно определенная симметрическая матрица.

Приравнявая выражения (14) и (15), получим уравнение функции Ляпунова в квадратичной форме:

$$A^T Q + Q A = -C. \quad (16)$$

Уравнение (16) называется матричным уравнением Ляпунова. Уравнение (16) ставит в соответствие всякой симметричной матрице  $Q$  матрицу  $C$  и наоборот. Это соответствие линейно. Элементы матрицы  $Q$  определяются из

(16) решением  $\frac{n(n+1)}{2}$  уравнений, где  $n$  - число уравнений. Если задаться

положительно определенной симметричной матрицей  $C$  (при этом найденная из (16) матрица  $Q$  окажется также положительно определенной), то ввиду линейности и стационарности системы (12) получим, согласно теореме Ляпунова, асимптотическую устойчивость ее положения равновесия. При этом условия устойчивости должны быть строго эквивалентными полученным из критериев Рауса – Гурвица.

Устойчивость исследуемой динамической системы требует положительности главных миноров матрицы  $Q$ . В общем случае  $Q_n > 0, \Delta_{li} > 0$ , где  $n$  – количество генераторов.

Согласно теореме Сильвестра, необходимым и достаточным условием устойчивости исследуемой системы при малых возмущениях является положительность главных диагональных миноров матрицы  $Q$ , которая, например, для трехгенераторной системы имеет вид:



$$Q_3 = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0, \quad (17)$$

т.е.  $\Delta_{Л1} = q_{11} > 0$ ,  $\Delta_{Л2} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{vmatrix} > 0$ ,  $\Delta_{Л3} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0$ .

где  $\Delta_{Л1} - \Delta_{Л3}$  миноры матрицы  $Q$ .

Используем некоторый функционал, называемый в теории вложения образом исследуемой системы в виде дробно-полиномиальной функции:

$$\omega(p) = f(p) = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad (18)$$

где  $a(p)$  и  $b(p)$  – полиномиальные функции, соответственно, знаменатель и числитель передаточной матрицы математической модели исследуемой системы.

Для общего случая, когда задана дробно-полиномиальная матрица, то образ имеет вид:

$$\omega(p) = F(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \frac{1}{a(p)} [b_{ij}(p)]. \quad (19)$$

Необходимо отметить, что образ при синтезе характеризует совокупность желаемых динамических и статических свойств, а при анализе - требуемое свойство проектируемой системы.

В третьей главе диссертации **«Исследование малых колебаний электроэнергетических систем на основе матричных методов»** сформированы математические модели малых колебаний простой и сложной электроэнергетических систем на основе абсолютных углов генераторов.

Проведен анализ малых колебаний энергосистемы Узбекистана при совместном использовании фундаментальных методов уравнений узловых напряжений и метода функции Ляпунова в квадратичной форме. На их основе разработана программа расчета пределов устойчивости генераторов энергосистемы Узбекистана.

При создании программы расчета пределов устойчивости был использован алгоритм, показанный на рис. 1.

Данный алгоритм работает следующим образом:

- производится расчет нормального режима электрической системы;
- анализируется знак определителя полученной матрица Якоби с целью исключения нарушения апериодической устойчивости;
- формируется функция Ляпунова в квадратичной форме и согласно критерию Сильвестра проверяется знак миноров (по главной диагонали) положительно определенной функции  $Q$ ;

- производится утяжеление режима, т.е. в одном или нескольких нагрузочных узлах постепенно увеличивается мощность нагрузки вплоть до нарушения статической устойчивости, когда главные миноры матрицы  $Q$  меняют свой знак;

- завершение алгоритма и вывод результатов о значения углов и напряжений генерирующих узлов, а также определение генераторного узла первым устремляющегося к пределу устойчивости.

В качестве исходной информации для расчета нормального режима использовались: топология эквивалентной схемы энергосистемы Узбекистана; параметры элементов схемы энергосистемы; уровни генерации и потребления.

В функционал программного продукта входит:

- возможность ввода данных для электрических систем любой сложности и конфигурации;

- позволяет вводить информацию для P-V и P-Q узлов;

- возможность задания минимального и максимального значения реактивной мощности в генераторных узлах;

- расчет нормального режима с последующим выводом результатов;

- построение характеристик изменения главного минора матрицы функции Ляпунова в квадратичной форме для генерирующих узлов;

- определение границ устойчивости для всех генерирующих узлов и нахождение узла, первым приближающимся к пределу устойчивости.

Установившийся режим и устойчивость рассчитывается для схемы энергосистемы Узбекистана. В эквивалентной схеме энергосистемы имеются всего 105 узлов, из них 22 узла генерирующие. В исследуемой схеме приведены результаты фактического замера уровней генерации и потребления мощности Национальным диспетчерским пунктом энергосистемы Узбекистана. Данные фактического замера датированы 20 июня 2018 года, показания, снятые в часы вечернего максимума (21:00).

На рис. 2 показаны характеристики изменения первых диагональных миноров матрицы  $Q$  функции Ляпунова в квадратичной форме, а также границы устойчивости для каждого из генерирующих узлов энергосистемы. В данном случае использовался критерий  $q_{11} > 0$ , т.е. положительность первого главного минора матрицы  $Q$  из матричного уравнения Ляпунова.

Согласно алгоритму, приведенному на рис. 1 постепенно была увеличена нагрузка в Юго-Западной и Северо-Западной частях энергосистемы до тех пор, пока минор  $q_{11}$  не изменил свой знак на отрицательный.

Приведенные характеристики показывают, что генераторы, расположенные в 7 и 8 позициях (Туямуюнская ГЭС, Тахиаташская ТЭС) узлах энергосистемы первыми приближаются к пределу устойчивости, и их предельные углы составляют 118.9 эл. град. для генераторов Туямуюнская ГЭС и 121.4 эл.град. для генераторов Тахиаташской ТЭС.

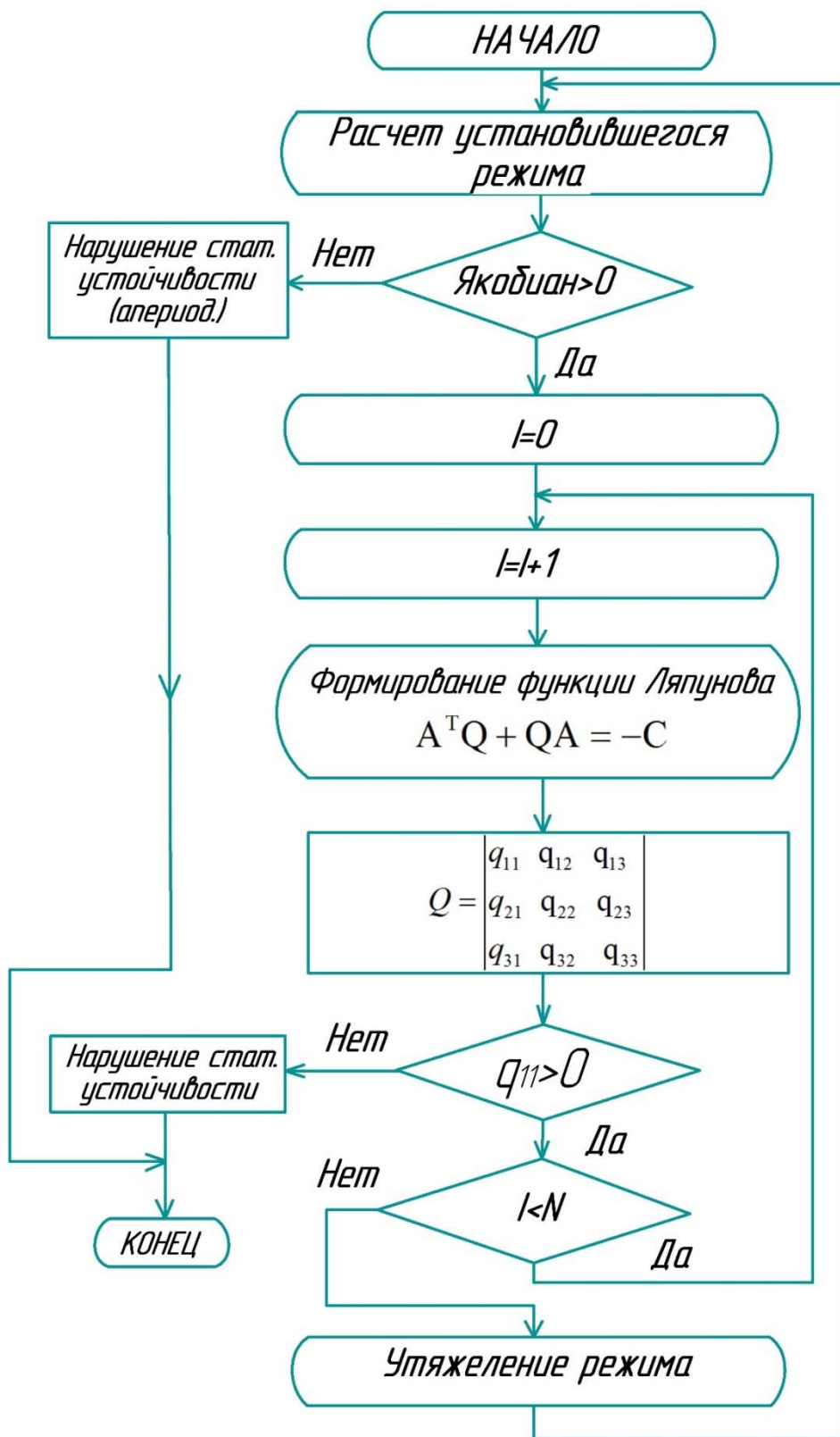
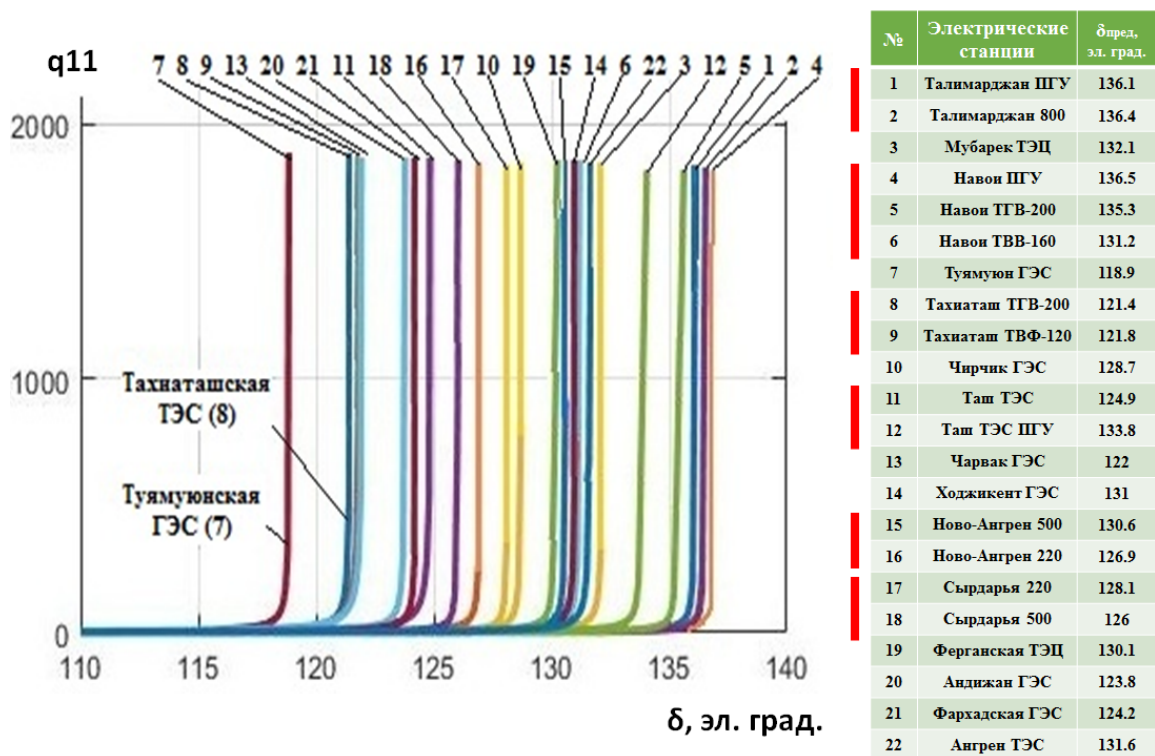


Рис.1. Алгоритм исследования малых колебаний методом функции Ляпунова в квадратичной формы.



**Рис. 2. Характеристики изменения первых диагональных миноров матрицы Q функции Ляпунова в квадратичной форме.**

Генераторы Тахиаташской ТЭС с установленной мощностью в 730 МВт в нормальном режиме несли нагрузку 420 МВт. А генераторы Туямуюнской ТЭС с установленной мощностью 150 МВт несли нагрузку в объеме 34 МВт.

При наличии данной информации диспетчеры ЭЭС принимают решение по регулированию режима и устойчивости.

В четвертой главе диссертации «**Аналитический синтез настроечных параметров систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов**» исследуются методы по управлению полюсами математической модели регулируемой электроэнергетической системы. Определена матрица регулятора электрической системы, и осуществлена проверка модели энергосистемы Узбекистана на статическую и динамическую устойчивость.

На кафедре «Электрические станции, сети и системы» ТашГТУ разработана и предложена математическая модель современного регулятора в виде матрицы коэффициентов регуляторов возбуждения синхронных генераторов в общем виде:

$$K = \begin{bmatrix} k_{Eq1}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eq1}^{\Delta\delta_n} & k_{Eq1}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eq1}^{\Delta s_n} \\ k_{Eq2}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eq2}^{\Delta\delta_n} & k_{Eq2}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eq2}^{\Delta s_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{Eqn}^{\Delta\delta_1} & \dots & k_{Eqn}^{\Delta\delta_n} & k_{Eqn}^{\Delta s_1} & \dots & k_{Eqn}^{\Delta s_n} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где  $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_j}$  - коэффициент усиления автоматического регулятора возбуждения  $i$ -го генератора, причем  $i, j=1-n$ . Размер матрицы (20) равен  $n \times 2n$ .

Если  $i=j$ , то осуществляется собственное регулирование, если  $i \neq j$ , то взаимное регулирование. Очевидно, что в сложной ЭЭС взаимное регулирование как правило не используется, поэтому  $k_{E_{qi}}^{\Delta \delta_j} = 0$ , так как  $i \neq j$ . Здесь  $k_{E_{qi}}^{\Delta \delta_i}$  - коэффициент усиления по каналу АРВ  $i$ -го генератора по отклонению абсолютного угла, а  $k_{E_{qi}}^{\Delta s_i}$  - соответственно, по отклонению скольжения данного генератора.

Здесь приведен действенный способ полного размещения полюсов сложной электроэнергетической системы, основанный на методе декомпозиции модели исходной системы.

Вводится в рассмотрение следующая многоуровневая декомпозиция ММО-системы (3) с парой матриц  $(A, B)$ , где  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times r}$ .

На рис. 3 приведен алгоритм синтеза регулятора, обеспечивающего заданное размещение полюсов. Последовательность работы алгоритма заключается в следующем:

- задаются матрицы  $A_0=A, B_0=B$ ;
- вычисляется  $L=\text{ceil}(n/r) - 1$ ;
- задаются матрицы желаемых полюсов системы  $\Phi=\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_L$ , такие

что  $\bigcup_{i=1}^{L+1} \text{eig}(\Phi_i - 1)$  - желаемый спектр замкнутой системы;

- вычисляется ортогональный аннулятор  $V_0^\perp = B^\perp$ , а затем матрицы  $A_1 = B^\perp A B^{\perp T}, B_1 = B^\perp A B \dots$

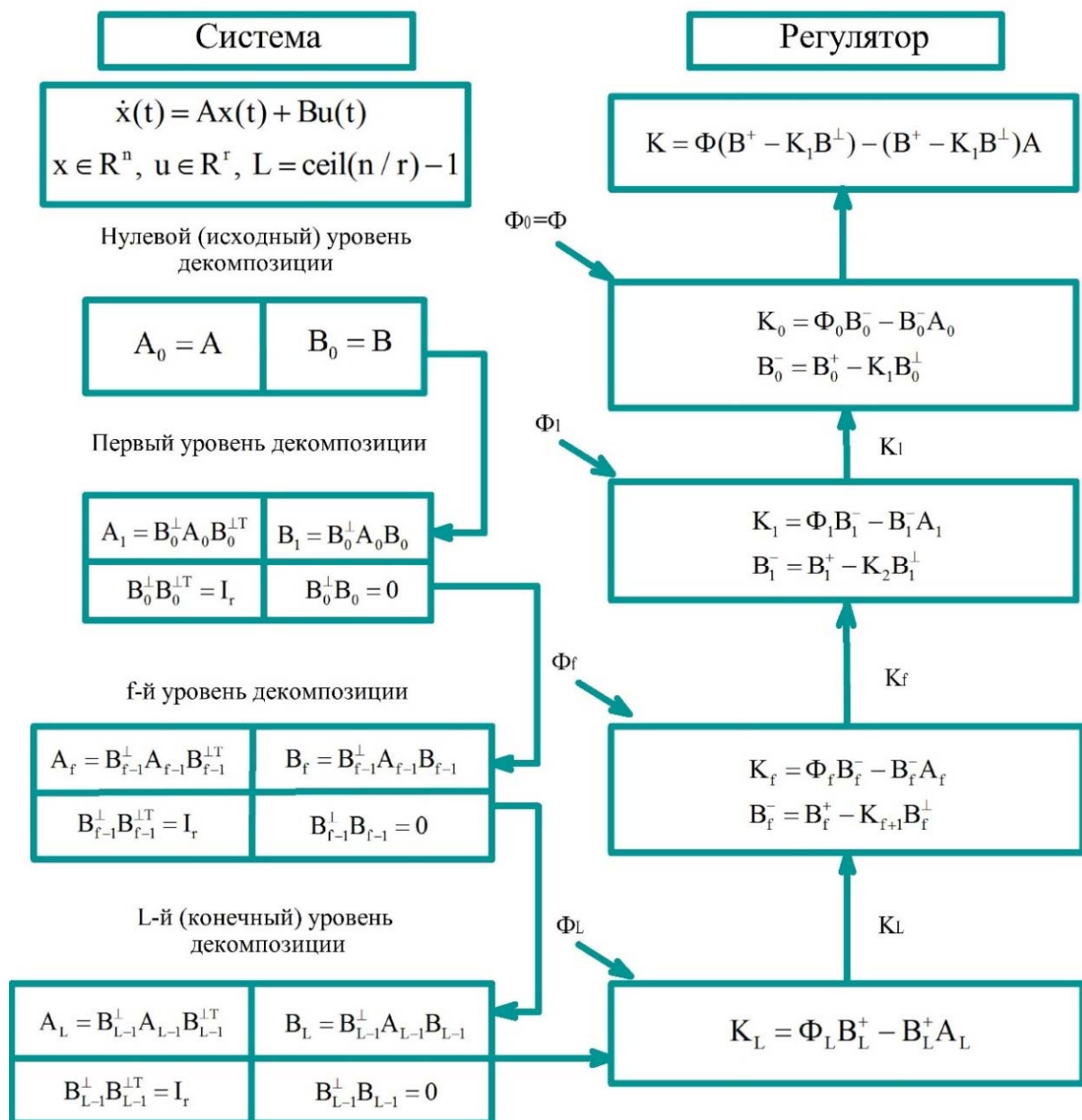
- вычисляется ортогональный аннулятор  $V_f^\perp$ , а затем матрицы  $A_{f+1} = B_f^\perp A_f B_f^{\perp T}, B_{f+1} = B_f^\perp A_f B_f \dots$

- вычисляется ортогональный аннулятор  $V_{L-2}^\perp$ , а затем матрицы  $A_{L-1} = B_{L-2}^\perp A_{L-2} B_{L-2}^{\perp T}, B_{L-1} = B_{L-2}^\perp A_{L-2} B_{L-2} \dots$

- вычисляется ортогональный аннулятор  $V_{L-1}^\perp$ , а затем матрицы  $A_L = B_{L-1}^\perp A_{L-1} B_{L-1}^{\perp T}, B_L = B_{L-1}^\perp A_{L-1} B_{L-1} \dots$

- последовательно вычисляются матрицы

$$\begin{aligned}
 K_L &= \Phi_L B_L^- - B_L^- A_L, \\
 B_{L-1}^- &= B_{L+1}^+ - K_L B_{L-1}^\perp, \quad K_{L-1} = \Phi_{L-1} B_{L-1}^- - B_{L-1}^- A_{L-1}, \dots, \\
 B_1^- &= B_1^+ - K_2 B_1^\perp, \quad K_1 = \Phi_1 B_1^- - B_1^- A_1, \\
 B_0^- &= B_0^+ - K_1 B_0^\perp, \quad K_0 = \Phi_0 B_0^- - B_0^- A_0.
 \end{aligned}$$



**Рис. 3. Алгоритм полного размещения полюсов системы.**

Здесь знаком  $\perp$  обозначены так называемые матричные делители нуля;  $B^+$  – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза.

На рис. 4 приведены основные генерирующие и нагрузочные мощности энергосистемы.

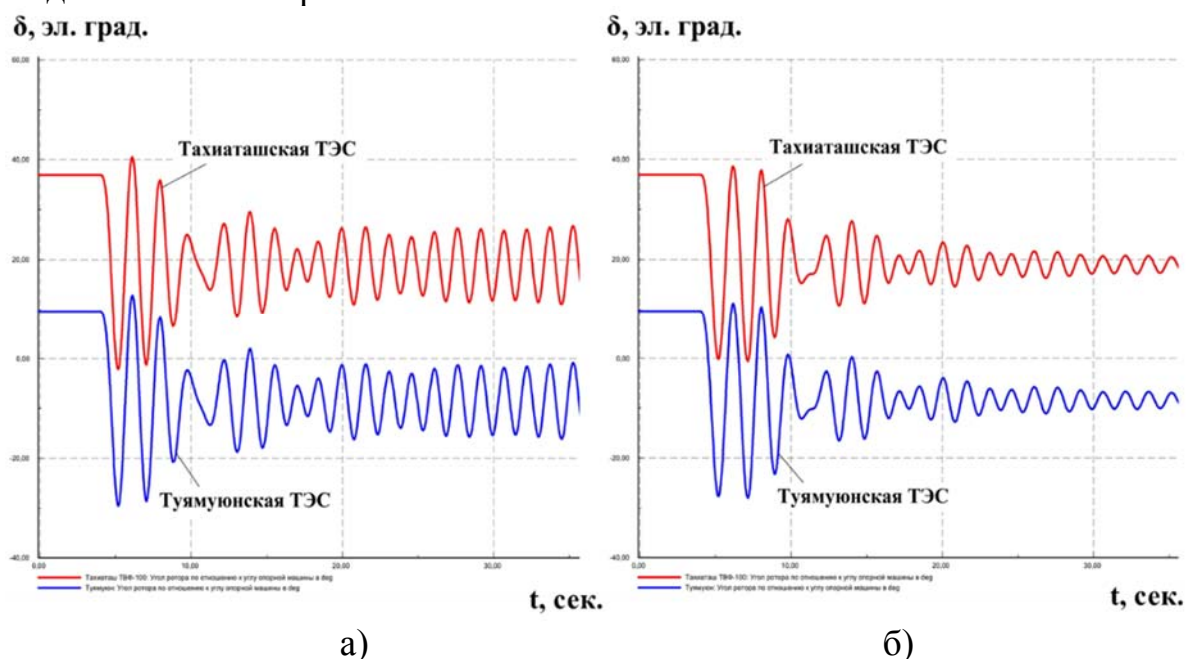
Для подтверждения адекватности полученных результатов границ устойчивости генерирующих узлов энергосистемы (рис. 2) и с целью анализа динамических свойств ЭЭС в программном комплексе DIGSilent PowerFactory было произведено виртуальное моделирование электрической системы.

В установившемся режим до утяжеления режима переток мощности от Центральной части энергосистемы в Юго-Западную составлял 659,7 МВт.



Малые возмущения будем имитировать утяжелением режима, заключающееся в постепенном увеличении нагрузки. Условно разделим схему энергосистемы на зоны. Будем постепенно увеличивать нагрузку в Северо-Западной и Юго-Западной частях электрической системы вплоть до нарушения устойчивости. В результате утяжеления переток мощности от Центральной в Юго-Западную часть составил 1407 МВт.

На рис. 5 показаны характеристики изменения углов нагрузки генераторов Туямуюнской ГЭС и Тахиаташской ТЭС при наличии демпферных коэффициентов синхронных машин и автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов. Характеристики получены при постепенном увеличении нагрузки в Северо-Западной и Юго-Западной частях энергосистемы.



**Рис. 5. Характеристики изменения углов нагрузки при утяжелении режима:** а) базовая настройка регулятора; б) предлагаемая настройка регулятора.

При увеличении нагрузки наблюдаются значительные колебания углов нагрузки генераторов, причем углы непрерывно увеличивались во времени. В результате увеличения углов нагрузки произошло самораскачивание генераторов Туямуюнской ГЭС и Тахиаташской ТЭС (рис. 5, а). Устойчивость нарушена.

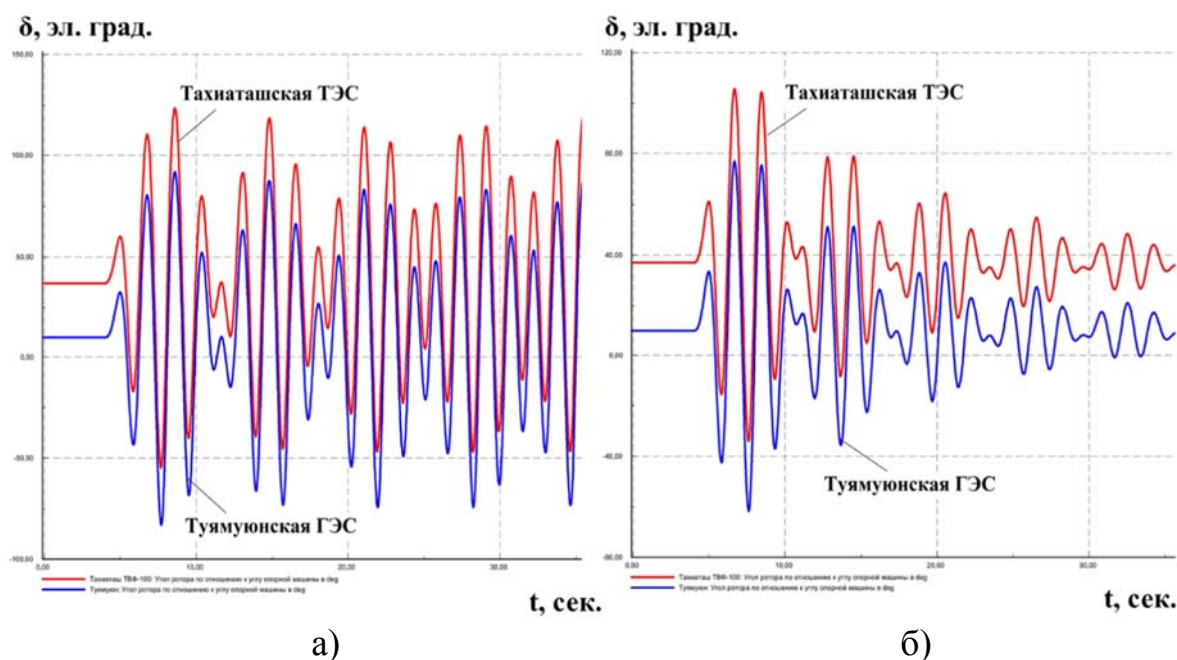
На рис. 5, б получены характеристики изменения углов нагрузки синхронных машин с учётом предлагаемого регулятора (20). Переходной процесс носит колебательный характер, время затухания колебаний находится в пределах 20 сек., устойчивость сохранена.

Далее проведен аналогичный анализ динамических свойств электрической системы при возникновении больших возмущений. Большие возмущения будем представлять в виде двухфазного короткого замыкания на



землю на 100-м километре воздушной линии напряжением 500 кВ - Талимарджан-Каракуль.

Продолжительность короткого замыкания будет составлять – 0,12 сек. После чего линия будет отключена средствами релейной защиты. Через 0,2 сек. сработает трехфазное автоматическое повторное включение (АПВ), тем самым производя повторное включение линии электропередачи, однако АПВ в данном опыте будет неуспешным, так как линия была включена на действующее КЗ. Еще через 0,12 сек. линия вновь будет отключена релейной защитой, спустя еще 0,2 сек. повторно сработает АПВ. После двукратного срабатывания АПВ короткое замыкание устранится и переток по линии восстановится.



**Рис. 6. Характеристики изменения углов нагрузки при двухфазном коротком замыкании на землю: а) базовая настройка регулятора; б) предлагаемая настройка регулятора.**

Как видно из рис. 6, а в результате короткого замыкания возникли значительные колебания углов нагрузки генераторов Тахиаташской ТЭС и Туямуюнской ГЭС. Устойчивость была нарушена.

На рис. 6, б показаны характеристики изменения углов нагрузки при двухфазном коротком замыкании на землю. При возникновении КЗ наблюдаются колебания углов генераторов, однако процесс носит затухающий характер, максимальное время затухания переходного процесса составило около 40 сек. Амплитуда возникших колебаний и их демпфирование свидетельствует о работе систем АПВ. Устойчивость сохранена в результате предложенного закона регулирования (20) АПВ синхронных генераторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований, проведенных по теме «Методы и алгоритмы исследования переходных режимов управляемых электрических систем» диссертационной работы доктора философии (PhD) по техническим наукам, представлены следующие выводы:

1. Матричные методы исследования режимов ЭЭС, в том числе переходных, являются эффективными с точки зрения их программной реализации и возможности учета взаимовлияния различных параметров режима и видов возмущений. В результате применения этих методов улучшается возможность управления электрическими системами.

2. Разработаны математические модели электроэнергетических систем относительно абсолютных углов синхронных генераторов, а также получены модели автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.

3. На основе совместного использования фундаментальных методов - уравнений узловых напряжений и функции Ляпунова в квадратичной форме разработана программа по исследованию устойчивости ЭЭС произвольной сложности. В результате появилась возможность определить генераторы энергосистемы, первыми приближающимися к пределу устойчивости ( $\Delta_{л11}=q_{11}>0, \frac{dq_{11}}{d\Pi} > 0$ ).

4. Предложен закон и разработана математическая модель управления возбуждением синхронных генераторов, позволяющие повысить запас устойчивости и улучшить динамические свойства ЭЭС при различных возмущениях.

5. С целью увеличения запасов устойчивости управляемой сложной электрической системы разработана методика, основанная на декомпозиции и канонизации матриц, позволяющая осуществлять соответствующее перемещение полюсов.

6. В результате применения разработанных программ и предложенного закона управления возбуждением синхронных генераторов получен суммарный экономический эффект 150 545,7 т. сум.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREE  
DSc.03/10.12.2019.T.03.03 AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**MAKHMUDOV TOKHIR FARKHADOVICH**

**METHODS AND ALGORITHMS FOR RESEARCHING TRANSIENT  
MODES OF CONTROLLED ELECTRICAL SYSTEMS**

**05.05.02 – Electrical engineering. Electric power stations, systems. Electrotechnical  
complexes and installations**

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PHD)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent-2020**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2019.2. PhD/T602.

Dissertation has been prepared at the Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) on the website of the Scientific Council ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) and on the website "ZiyoNet" Information and education portal ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific consultant:**

**Allaev Kakhraman Rakhimovich**  
Doctor of technical sciences, Professor,  
Academician

**Official opponents:**

**Pirmatov Nurali Berdiyrovich**  
Doctor of technical sciences, Professor

**Sadullaev Nasullo Nematovich**  
Doctor of technical sciences, Professor

**Leading organization:**

**JSC «Thermoelectroproject»**

The defense of dissertation will be take place " 25 " 11 2020 at 13<sup>00</sup> o'clock at meeting of Scientific Council DSc.03/10.12.2019.T.03.03 Tashkent State Technical University. (Address: 2, University str., Tashkent 100095. Tel./fax: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be reviewed at the Information-resource Center of the Tashkent State Technical University (Registered number - 173). Address: 2, University str., Tashkent 100095. Tel.: (99871) 227-03-41.

Abstract of dissertation was distributed on " 13 " November 2020 year.  
(mailing report № 9 on " 13 " November 2020 year).



*[Signature]*  
**R.A. Zakhidov**  
Deputy Chairman of the Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor, Academician

*[Signature]*  
**O.X. Ishnazarov**  
Scientific secretary of Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Senior Scientific Researcher

*[Signature]*  
**M.I. Ibadullayev**  
Chairman of scientific seminar under Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research** is to develop methods, algorithms and software controls based on improved laws for the formation of automatic excitation regulators.

**Tasks of the research:**

analysis of modern methods and algorithms for studying the stability of complex electrical systems;

development of a matrix mathematical model of a multi-machine electric power system within the framework of a positional model and taking into account the absolute angles of synchronous machines;

development of algorithms for the analysis of static stability of electrical systems using matrix methods;

development of a methodology based on the method of decomposition and canonization of matrices, which makes it possible to move the poles of electrical systems in order to increase the stability margins;

development of a mathematical model and algorithms for calculating tuning parameters of systems for automatic regulation of excitation of synchronous generators based on matrix methods.

**Object of the research** is complex electric power systems, taking into account automatic excitation regulators of synchronous generators.

**Scientific novelty of the research** is as following:

a matrix mathematical model of a complex electric power system with respect to the absolute angles of synchronous generators has been developed;

a method and program has been developed for determining the generator (station) of a complex electrical system, the first approaching the stability limit;

improved methods for ensuring the stability of the electric power system by moving the poles of the matrix transfer function of the mathematical model of the electric power system;

a matrix mathematical model of the excitation controller and a program for determining the parameters and coefficients of the controller matrix, automatic excitation controllers of synchronous machines have been developed;

created an algorithm and a program based on the method of decomposition and canonization of matrices, which allows to move the poles of electrical systems in order to increase the stability margins.

**The practical results of the study** are as follows:

algorithms have been developed for calculating transient modes of complex electrical systems, based on taking into account the absolute angle of synchronous generators, which are recommended for use in dispatching services of electric power systems;

algorithms and programs have been developed to increase the stability margin of electrical systems, which make it possible to carry out multivariate calculations in the design of power systems;

an effective algorithm and program for the application of the technology of embedding systems for the study of small oscillations of controlled electrical

systems has been developed, deepening the foundations of the analysis of small oscillations of electrical systems;

in order to improve the damping properties of electrical systems, an algorithm and a program for the complete placement of the poles of a regulated electrical system have been created.

**The reliability of the research results** is substantiated by the use of practically proven mathematical methods of the theory of stability of electrical systems, fundamental methods for the equation of nodal voltages and Lyapunov functions in quadratic form, and numerous experimental calculations using modern tools and techniques based on modern matrix theory.

**Scientific and practical significance of the research results.**

The scientific significance of the results obtained in the research process lies in the possibility of an in-depth study of the static stability of complex electric power systems, taking into account all types of stability disturbances: aperiodic disturbance, self-swinging, self-excitation by one method.

The practical significance lies in the possibility of using the developed algorithms and programs in the practice of dispatch control in order to determine the stability of power systems, generators, the first to approach the stability limit.

**Implementation of research results.** Based on the scientific results obtained on the preliminary determination of the stability limits of the generating units of the power system of Uzbekistan and generators approaching this limit:

a method for determining damage caused by damage during the operation of power equipment was introduced in the Main Directorate of System Services (certificate of JSC National Electric Networks of Uzbekistan dated September 17, 2020 No. 01-02-06/3237). As a result, using the developed methodology, it was possible to obtain an economic effect in the amount of 150 545,7 thousand soums.

an algorithm and a program were introduced to determine the stability limits of regulated electrical systems in the Main Directorate of System Services (certificate of JSC National Electric Grids of Uzbekistan dated September 17, 2020 No. 01-02-06/3237). As a result, generating units with the least stability reserves were identified: Tuyamuyunskaya HPP - boundary angle 118.9 el.deg.; Takhiatash TPP - boundary angle 121.4 el.deg.

the developed methods and algorithms for studying the dynamic properties of electric power systems and their control systems were introduced in the Main Directorate of System Services (reference from JSC National Electric Grids of Uzbekistan dated September 17, 2020 No. 01-02-06/3237). As a result, the decay time of transient processes occurring in power systems as a result of small and large disturbances has been reduced to 10 seconds.

**Structure and scope of the dissertation.** The structure of the thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The scope of the thesis consists of 153 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Применение функции Ляпунова в квадратичной форме для исследования статической устойчивости регулируемой электрической системы // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент, 2012. - №3-4. С. 10-19. (05.00.00; №21).
2. Махмудов Т.Ф. Полное размещение полюсов многомашинной электрической системы // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент, 2017. - №3-4. С. 41-46. (05.00.00; №21).
3. Allaev K., Makhmudov T. Investigations of the invariance of the output of a complex electric system based on the technology of embedding systems // Journal of Electrical and Electronics Engineering. India, 2018. - №8(1). PP. 1-8. (05.00.00; №29).
4. Allaev K.R., Makhmudov T.F. Analysis of Small Oscillations in Complex Electric Power Systems // Engineering. The USA, 2018. - №10. PP.253-261. (05.00.00; №8).
5. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махкамов Т.А. Применение технологии вложения систем для исследования инвариантности выхода сложной электрической системы по переменным состояниям // Электричество. Российская Федерация, Москва, 2019. - №2. – С. 26-33. (05.00.00; №94).
6. Махмудов Т.Ф. Исследование статической устойчивости сложных электрических систем // Вестник ТашГТУ. Ташкент, 2019. - №2. – С. 56-62. (05.00.00; №16).
7. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Исследования инвариантности выхода сложной электрической системы на основе технологии вложения систем // Главный энергетик. Российская Федерация, 2019. - №3. – С. 71-77. (05.00.00; №25).
8. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Об исследовании малых колебаний сложных электрических систем // Электричество. Российская Федерация, Москва, 2019. - №4. – С. 32-38. (05.00.00; №94).
9. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Исследование статической устойчивости сложных электрических систем // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. Российская Федерация, 2019. - 12(8). PP. 929-938. (05.00.00; №1).
10. Allaev K., Makhmudov T. Prospects of diversification and ensuring energy safety of Uzbekistan / E3S Web of Conferences. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019), Tashkent, 2019. - Vol. 139, 01002. (05.00.00; Scopus).

11. Allaev K., Makhmudov T. Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems // Electrical Engineering. Germany, Berlin, 2020. – Vol. 102, №1. PP. 309-319. (05.00.00; Scopus).

## **II бўлим (II часть; part II)**

12. Махмудов Т.Ф. К анализу многосвязных систем на базе теории вложения / Международный сборник научных трудов «Электротехнические системы и комплексы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2013. Выпуск 21. – С. 259-266.
13. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Совместное применение уравнений узловых напряжений и функции Ляпунова в квадратичной форме для исследования статической устойчивости регулируемой электрической системы / Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». Россия, Иваново, 2013. – С. 68-72.
14. Махмудов Т.Ф. Анализ статической устойчивости электрической системы, снабженной автоматическими регуляторами возбуждения, с использованием функции Ляпунова в квадратичной форме / Научные труды IV международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Россия, Новочеркасск, 2013. – С. 366-369.
15. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махкамов Т.А. Технология вложения как метод исследования статической устойчивости электрических систем // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент, 2014. - №3. С. 18-34.
16. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. К анализу статической устойчивости трехгенераторной электрической системы / Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014». Россия, Иваново, 2014. – С. 28-32.
17. Махмудов Т.Ф. К анализу устойчивости электрической системы при малых колебаниях / Международный сборник научных трудов «Энергетические и электротехнические системы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2014. – С. 105-112.
18. Махмудов Т.Ф. К анализу устойчивости идеализируемой электрической системы / Пятая всероссийская научно-практическая конференция «Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов». Россия, Волжский, 2014. – С. 49-54.
19. Allaev K.R., Mirzabaev A.M., Makhmudov T.F., Makhkamov T.A. Matrix Analysis of Steady-State Stability of Electric Power Systems // AASCIT Communications. USA, 2015. – №2(3). – PP. 74-81.
20. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махкамов Т.А. Исследования малых колебаний в регулируемой электрической системе методом технологии вложения систем // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент, 2015. - №1-2. С. 32-41.



21. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махкамов Т.А. Упрощенный критерий статической устойчивости электрических систем // «ЭЛЕКТРО». Российская Федерация, 2015. - №2. – С. 28-32.
22. Allaev K.R., Mirzabaev A.M., Makhmudov T.F., Makhkamov T.A. Simplified Criterion of Steady-State Stability of Electric Power Systems // Journal of Power and Energy Engineering. USA, 2015. - №3. – PP. 224-231.
23. Махмудов Т.Ф. Анализ влияния системы автоматического регулирования возбуждения генераторов Чарвакской ГЭС на динамическую устойчивость / Международный сборник научных трудов «Энергетические и электротехнические системы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2015. – С. 163-168.
24. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Выборочное управление полюсами регулируемой электрической системы с использованием метода канонизации / VI Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи». Россия, Иваново, 2015. – С. 147-150.
25. Лосев Д.Ю., Махмудов Т.Ф. Исследование влияния компенсации реактивной мощности на параметры режима электрической системы / «Фан ва техника таракқиётида интелектуал ёшларнинг ўрни» Республика илмий анжумани Маърузалар тўплами. Тошкент, 2015. – С. 97-99.
26. Махмудов Т.Ф. Анализ малых колебаний в сложных электроэнергетических системах / Международный сборник научных трудов «Энергетические и электротехнические системы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2016. – С. 94-101.
27. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Исследование статической устойчивости многомашинной электрической системы на основе технологии вложения систем / VII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016». Россия, Казань, 2016. – С. 31-34.
28. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Технология вложения систем как метод анализа сложных систем / Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016». Россия, Иваново, 2016. – С. 66-67.
29. Махмудов Т.Ф. Матричная методика управления полюсами электрической системы / Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием) «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов». Россия, Уфа, 2016. – С. 604-607.
30. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Технология вложения систем как метод исследования динамических режимов электрических систем / VIII Международная молодежная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2017». Россия, Самара, 2017. – С. 233-236.

31. Махмудов Т.Ф. Анализ статической устойчивости электрической системы применением технологии вложения систем при полном учете автоматических регуляторов возбуждения / XII Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». Россия, Казань, 2017. – С. 113-118.
32. Махмудов Т.Ф. Внедрение асинхронных турбогенераторов в современные электрические системы / Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». Россия, Иваново, 2017. – С. 243-244.
33. Махмудов Т.Ф. Размещение полюсов многомашинной электрической системы / Международный сборник научных трудов «Энергетические и электротехнические системы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2017. – С. 101-106.
34. Allaev K.R., Makhmudov T.F. Investigation of The Small Oscillations of Electrical Systems // Energy Research. UK, London, 2018. - Volume 2, Issue 1. PP. 13-23.
35. Makhmudov T.F. Technology of Embedding Systems as a Method for Studying the Dynamic Regimes of Complex Electric Systems // American Journal of Energy and Power Engineering. USA, 2018. - Vol. 5, No. 2. PP.15-19.
36. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Технология вложения систем как метод исследования динамических режимов электрических систем // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. Российская Федерация, 2018. - №4(73). – С. 33-39.
37. Махмудов Т.Ф., Шаназаров А.Э. Методика управления полюсами регулируемой электрической системы / Международный сборник научных трудов «Энергетические и электротехнические системы». Российская Федерация, Магнитогорск, 2018. – С. 64-70.
38. Нурматов О.Е., Махмудов Т.Ф. Анализ переходных процессов в электроэнергетических системах с учетом гидроэнергетических установок / Спец. выпуск «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». Ташкент, 2019. - №3-4. - С. 231-236.
39. Махмудов Т.Ф. Вопросы эквивалентирования сложных электрических систем / Сб. статей международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2019». Севастополь, 2019. – С. 1021-1024.
40. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Программа по применению технологии вложения систем для исследования малых колебаний регулируемой электрической системы // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 03176, 01.06.2015.
41. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махамов Т.А. Программа по управлению полюсами регулируемой электрической системы применением технологии вложения систем // Агентство по

- интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 03515, 04.02.2016.
42. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф., Лосев Д.Ю. Программа по полному размещению полюсов регулируемой электрической системы // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 05142, 16.03.2018.
43. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Программа по повышению запаса устойчивости электрических систем // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 05194, 11.04.2018.
44. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Программа по определению границ устойчивости управляемых электрических систем // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 06689, 03.07.2019.