

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ва
«ИЛМІЙ-ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МАСЪУЛИЯТИ ЧЕКЛАНГАН
ЖАМИЯТ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМІЙ ДАРАЖАСИНИ
БЕРУВЧИ 14.07.2016.Т.02.01 РАҚАМЛИ ИЛМІЙ КЕНГАШ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

МИРЗАБАЕВ АКРАМ МАХКАМОВИЧ

**ЭЛЕКТР ТИЗИМЛАРИНИНГ СТАТИК ТУРҒУНЛИГИНИ ТАҲЛИЛ
ҚИЛИШНИНГ МАТРИЦА УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.05.02 – «Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар»
(техника фанлари)**

.

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2016

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Мирзабаев Акрам Махкамович

Электр тизимларининг статик турғунлигини таҳлил қилишнинг матрица
 усуллари ва алгоритмлари.....3

Мирзабаев Акрам Махкамович

Матричные методы и алгоритмы анализа статической устойчивости электри-
 ческих систем..29

Mirzabaev Akram Makhkamovich

Matrix methods and algorithms for steady–state stability analysis of electric power
 systems..... 55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works81

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ва
«ИЛМІЙ-ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МАСЪУЛИЯТИ ЧЕКЛАНГАН
ЖАМИЯТ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМІЙ ДАРАЖАСИНИ
БЕРУВЧИ 14.07.2016.Т.02.01 РАҚАМЛИ ИЛМІЙ КЕНГАШ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

МИРЗАБАЕВ АКРАМ МАХКАМОВИЧ

**ЭЛЕКТР ТИЗИМЛАРИНИНГ СТАТИК ТУРҒУНЛИГИНИ ТАҲЛИЛ
ҚИЛИШНИНГ МАТРИЦА УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.05.02 – «Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар»
(техника фанлари)**

.

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2016

хузуридаги Олий аттестация комиссиясида №30.06.2015/В2015.2.Т540 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университетида бажарилган. Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.tdtu.uz) ва «ZIYONET» таълим ахборот тармоғида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: Аллаев Кахрамон Рахимович

техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: Чемборисова Наиля Шавкатовна

техника фанлари доктори, профессор
(Россия Федерацияси)

Игамбердиев Хусан Закирович

техника фанлари доктори, профессор

Соколов Валерий Константинович

техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: «Энергия» координацион диспетчерлик маркази

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ва «Илмий-техника маркази» масъулияти чекланган жамият хузуридаги 14.07.2016.Т.02.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2016 йил “__” ____ соат __ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz).

Докторлик диссертацияси билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (__ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (99871) 246-03-41).

Диссертация автореферати 2016 йил “__” ____ куни тарқатилди.
(2016 йил “__” ____ даги __ рақамли реестр баённомаси)

Х.М.Муратов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси
т.ф.д., профессор

О.О.Зарипов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

Т.Ш. Гайибов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар
раис ўринбосари, т.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда дунё амалиётида электр энергетика тизимлари турғун ишлашини таъминлаш соҳасида электр энергияси ишлаб чиқариш ва истеъмол қилиш жараёнини интеллектуал технологиялар ютуқларига асосланган юқори самарадорликка эга бошқариш тизимларини яратиш жараёни етакчи ўринни эгаллайди. Жадал ривожланаётган замонавий электр энергетика тизимлари статик турғунлигини реал вақт жараёнида тезкор маълумотларни қайта ишлаш ва таҳлил қилишга асосланган ҳолда таъминлаш долзарб муаммолардан бири ҳисобланади. Бу борада ривожланган чет эл мамлакатларида режим параметрлари тебранишини ҳисобга олиб электр энергетика тизимлари турғунлигини таъминлаш учун бошқариш тизимларини такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. «Интеллектуал электр тизимларини яратиш, жумладан, Smart Grid тизимини яратиш учун АҚШ – 7,1 трлн., Хитой – 7,3 трлн., Япония – 0,8 трлн. доллар сарфламоқда. Smart Grid тизимларидан фойдаланиш энергия истеъмолини камайтириш ва ишончилиكنи ошириш ҳисобига АҚШга 2020 йилгача 1.8 трлн. доллар иқтисод қилиш имконини беради¹».

Ўзбекистон Республикасида электр энергияни ишлаб чиқариш ва электр энергетика тизимлари турғунлигини таъминлашни самарали ташкил қилиш юзасидан кенг қамровли чора тадбирлар амалга оширилмоқда. Бу борада, жумладан, электр энергиясини ишлаб чиқариш имкониятини берувчи парагаз ва газ турбина технологиясига асосланган юқори самарали ускуналар билан тўлиқ қайта жихозлаш, технологик объектларнинг юқори самарали бошқариш тизимларини яратиш ва бошқарув тизимларининг тадқиқ этиш усуллари ва алгоритмларини такомиллаштиришга бағишланган қатор илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Жаҳонда электр тизимлар турғунлигини аниқлашнинг янада такомиллашган усуллари, замонавий бошқарув мосламаларига эга мураккаб электр энергетика тизим режимларининг хусусиятларини назоратлаш имкониятини берувчи матрица усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Бу борада мақсадли илмий-тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: синхрон генераторлар автоматик ростлагичларини ҳисобга олган ҳолда электр тизимларининг турғунлигини назорат қилиш матрицали усуллари ва алгоритмларини яратиш, мураккаб электр тизимлари турғунлиги чегарасини назорат қилишнинг соддалаштирилган мезонларини ишлаб чиқиш, тизимларни киритиш технологияси асосида қўзғалишнинг автоматик ростлагичларини синтезлаш моделини яратиш. Юқорида келтирилган илмий-тадқиқотлар йўналишида бажарилаётган илмий изланишлар мазкур диссертация мавзуси долзарблигини изоҳлайди.

¹ Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы. Автоматизация и ИТ в энергетике, март 2011 № 3 (20) www.transform.ru: 31.05.2011 г.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2015 йил 5 майдаги ПҚ-2343-сон «2015-2019 йилларда иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия сарфи ҳажмини қисқартириш, энергияни тежайдиган технологияларни жорий этиш чора тадбирлари дастури тўғрисида» Қарори, Вазирлар Маҳкамасининг 2015 йил 13 августдаги 238-сон «Энергия самарадорлиги ва энергиянинг тикланадиган манба ларини ривожлантириш масалалари бўйича республика комиссияси тўғрисидаги низомни тасдиқлаш ҳақида» қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли барча меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹ Мураккаб электр энергетика тизимлар турғунлигини таъминловчи назорат тизимини яратишга йўналтирилган илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Princeton University, Iowa State University, Rutgers University, Massachusetts Institute of Technology, University of Baltimore (АҚШ), University Of Cambridge (Англия), Royal Institute Of Technology (Швеция), Dresden University of technology (Германия), The China Electric Power Research Institute (Хитой), Siemens (Германия), ABB (Швеция), Москва энергетика институти, Харбий хаво мухандислари академияси, (Россия), Тошкент давлат техника университети, «Илмий-техника Маркази» МЧЖда (Ўзбекистон) кенг қамровли илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Электр тизимлари ва матрицалар назарияси асосида мураккаб электр энергетика тизимларининг бошқарув жараёни моделлари ва алгоритмларини такомиллаштиришга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: электр тизимлари оптимал режимларини ва турғунлигини тадқиқ қилишга мўлжалланган EUROSTAG дастурлар мажмуалари яратилган, (Electricite de France, Франция); кичик тебранишлар ўткинчи жараёнларини бошқариш тизими яратилган (SMAS3, Испания), динамик тизимлар турғунлиги ва қувватлар балансини бошқариш SIMPOW тизими ишлаб чиқилган (ABB, Швеция), мураккаб электр тизимлари режимларининг ҳисоблаш дастурлари яратилган (MASS, Канада), электр энергетик тизимларида диспетчерлик бошқарув тизимларни IT-технологиялар асосида автоматлаштириш мажмуалари яратилган (Siemens, Германия, Москва энергетика институти, Россия, DYNSTACK, Австралия).

Дунёда замонавий компьютер технология ютуқлари асосида электр энергетика тизимлар турғунлигини интеллектуал бошқариш усуллари ишлаб чиқиш бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: мураккаб чизиқли динамик тизимлар турғунлиги масалаларини

¹ Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи: <http://www.dissereat.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.ifti.ru>. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем// Калуга, 2006. –720с. ва бошқа манбалар асосида иш лаб чиқилган.

ечиш учун тадқиқ қилишда янги матрица конструкциялари ва автоматик бошқарув тизимлари назариясига асосланган квадратик формадаги Ляпунов функциялари ва тизимларни киритиш технологияси усуллари ишлаб чиқиш; электр энергетика тизимлари турғунлигини назорат қилишнинг юқори самарали алгоритмларини яратиш; генераторлар мутлоқ бурчаги негизида ўтиш жараёнларнинг математик моделини яратиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Электр энергетика тизимлари турғунлигини таҳлил қилишнинг назарий ва амалий масалаларининг ечиш, жумладан тизимлар параметрларининг кичик тебранишлари жараёнида турғун ликни ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурларини яратиш масалалари билан машхур олимлар: П.С. Жданов, А.А. Горев, А.С. Лебедев, В.А. Веников, Ю.Н. Руденко, Н.И. Соколов, В.А. Строев, И.В. Литкенс, В.П. Васин, С.А. Совалов, Е.Д. Карасёв, О.В. Щербачёв, Ю.П. Горюнов, Э.С. Лукашов, В.В. Бушуев, Л.А. Кошечев, И.А. Груздев, А.Х. Есипович, А.А. Юрганов, Б.И. Аюев, Р. Anderson, А. Fouad, Р. Kundur, R .Byerly, R. Bennon, D. Sherman, D. Wong, G. Rogers, B. Porretta, Х.Ф. Фазилов, Т.Х. Насиров, Ж.А. Абдуллаев, В.К. Соколов, К.Р. Аллаев ва бошқалар шуғулланганлар.

Замонавий матрицалар назарияси ва уларни тизимларни бошқаришда тадбиқ этиш билан боғлиқ тадқиқотлар бир қатор олимлар томонидан олиб борилган, жумладан, Ф.Р. Гантмахер, Р.Е. Калман, А.А. Красовский, А.А.Воронов, Х. Розенброк, Ю.Н. Андреев, М. Уонем, П.Л. Фалба, Х.Д. Икрамов, В.Н. Рябченко, Е.М. Смагина, Н.Р. Юсупбеков, Х.З. Игамбердиев ва муҳим натижаларга эришилган, яратилган алгоритм ва дастурлар мажмуаси мураккаб динамик тизимларни лойихалаш ва бошқаришда қўлланилмоқда.

Мураккаб электр энергетика тизимлари турғунлигини таъминлаш ва режимларини бошқариш масалаларини ечиш билан боғлиқ тадқиқотлар бир қатор олимлар томонидан олиб борилган, жумладан В.Н. Буков, В.А.

Андреюк, Н.И. Во ропаи, М.Ш. Мисриханов ва бошқалар таҳлили шуни кўрсатадики, ҳозирги кунда мураккаб электр энергетика тизимлари

турғунлигини таҳлил қилишда матрица усуллари ва алгоритмлари тадбиқ қилинган ва маълум даражада ижобий на тижаларга эришилган. Шу билан

бирга, илмий нашрларда электр энергетика тизимлари бошқаришнинг

мукамал алгоритмларини яратиш ва маълум ёндашув ларни

тизимлаштириш, ҳамда ростлагич мосламаларини ҳисобга олган ҳолда бош

қарув жараёнларининг усуллари, моделлари ва алгоритмларни яратиш ва

янада такомиллаштиришга бағишланган илмий изланишлар етарли даражада кўрилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетининг илмий-тадқиқот

ишлари режасининг № 2016001- “Энергетика системаларининг оптимал ҳолатлари ва ўтиш жараёнларини ҳисоблаш, таҳлил қилиш ва уларни автоматик бошқаришнинг замонавий усуллари ишлаб чиқиш” (2015-2017йй.); А-3-96-“Ўзбекистон Респуб ликаси энерготизими электр истеъмолчилари юкламаларини оптимал бошқариш” (2015-2017йй.); Ф-2-33-“Насос станцияларининг энергетик самарадорлигини ва ишлаш ҳолатларининг математик моделлаштириш қонуниятларини аниқлаш” (2012-2016йй.) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

7

Тадқиқотнинг мақсади мураккаб электр тизимларида кичик тебра нишлар таҳлилининг матрицали усуллари ва алгоритмларини, статик турғунлик чегарасини аниқлашнинг соддалаштирилган усуллари ишлаб чиқиш ҳамда тизимларни киритиш технологияси негизида автоматик ростлагич моделларини синтезлашдан иборат.

Тадқиқотларнинг вазифалари:

бошқариладиган электр энергетика тизимлари статик турғунлигини тадқиқ қилиш бўйича мавжуд усуллар ва алгоритмларнинг замонавий ҳолатини тизимли таҳлил қилиш;

замонавий матрица назарияси ва Ляпунов функциялари асосида мураккаб электр энергетика тизимлари кичик тебранишлари тадқиқотларининг соддалаштирилган усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш;

тизимларни киритиш технологияси асосида ростланадиган электр тизимлари кичик тебранишлари тадқиқотлари усуллари ишлаб чиқиш; мураккаб электр энергетика тизимлари режими параметрларининг кичик кўзғалишларида тебранишларнинг демпферланиши ва турғунлигини таъминловчи электр тизимлар ростлагичларини синтезлаш моделини яратиш; ишлаб чиқилган матрица усуллари ва алгоритмлари асосида ростла надиган мураккаб электр тизимлар статик турғунлигининг ҳисоб-экспериментал тадқиқот-ларини ва тизимли таҳлилин бажариш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электр энергетика тизими режим параметрларининг кичик тебранишлари шароитида бошқарув тизимлари қаралган.

Тадқиқотнинг предмети ростланадиган электр тизимларининг кичик тебранишлари таҳлилининг матрица усуллари, алгоритмлари ва математик моделлари, тизимларни киритиш технологияси асосида кўзғалишни автоматик ростлагичлар моделларини синтезлаш усуллари.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида электр тизимлари, синтез ва матрицалар назариялари, автоматик бошқарув ва тизимларни киритиш технологияси усуллари, динамик тизимлар кичик тебраниши ва чизикли алгебра усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

квадратик шаклда Ляпунов функциялари асосида электр энергетика тизимлари турғунлигининг зарурий ва етарли шартларини таъминлайдиган, квадратик шаклдаги матрицанинг биринчи асосий минорининг ($q_{11}>0$), мусбатлигидан иборат бўлган, электр тизими статик турғунлигининг содда

лаштирилган мезони ишлаб чиқилган;

мураккаб электр тизими статик турғунлиги тадқиқотларини оддий «генератор-шина» схемасига келтириш имконини берадиган квадратик шаклда Ляпунов функцияларини ва тугун кучланишлар тенгламаларини биргаликда қўллаш усули ишлаб чиқилган;

электр энергетика тизимлари динамик хусусиятларини тадқиқ қилиш имконини берувчи тизимларни киритиш технологияси асосида мураккаб электр тизимининг муаммоли матрицаси ишлаб чиқилган;

8

электр энергетика тизимлари режим параметрларининг кичик қўзғалишларда тебранишларни демпферловчи ва турғунлигини таъминловчи қутбларни ўзгартириш алгоритми ишлаб чиқилган;

тизимларни киритиш технологияси асосида электр энергетика тизимларида кичик тебранишларнинг демпферланиши ва турғунлигини таъминловчи ростлагичлар математик модели ва синтезлаш алгоритми ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат: квадратик шаклдаги Ляпунов функциялари асосида олинган режим параметрлари кичик қўзғалишларида электр тизими статик турғунлиги шартларининг Гурвиц мезонлари шартларига мослиги исботланган; квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси биринчи асосий минори асосида электр энергетика тизимлари статик турғунлигининг аниқлаш жараенини тез латиш ва диспетчерлик бошқарувини осонлаштириш имконини берувчи соддалаштирилган мезони ишлаб чиқилган;

генераторлар мутлоқ бурчагига асосланган мураккаб электр тизимидаги кичик тебранишларда ўтиш жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилган; тизимларни киритиш технологияси асосида электр энергетика тизимлари динамик хусусиятларини тадқиқ қилиш имконини берувчи, мураккаб электр энергетика тизимининг математик модели ва муаммоли матрицаси ишлаб чиқилган;

тизимларни киритиш технологияси асосида электр энергетика тизимлари кичик тебранишларнинг демпферланиши ва турғунлигини таъминловчи қутбларни ўзгартириш ва ростлагичлар синтезлаш алгоритми ва дастури ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги электр тизимлари назариясининг амалиётида текширилган усуллари ва автоматик бошқарув тизимларини моделлаштириш усуллари қўлланилишидан келиб чиқади. Мураккаб электр энергетика тизимлари кичик тебранишларининг ишлаб чиқилган матрица усуллари асосида ўтказилган ҳисоблаш-экспериментал тадқиқотлари натижалари классик усуллар тадқиқотлар натижаларига мослиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Ляпунов матрица тенгламаси негизида статик турғунликнинг зарурий ва етарли шартларини таъминловчи, статик турғунликнинг бузилиш шартларини

соддалаштириб аниқлаш, шунингдек тизим генераторлари мутлоқ бурчаклари асосида мураккаб ростланадиган электр энергетика тизимларининг кичик тебранишлари тадқиқотларининг математик модели ишлаб чиқилганлигидан иборатдир. Тизимларни киритиш технологияси асосида таҳлилий жиҳатдан конструкцияланган мураккаб электр энергетика тизимлари ростлагич-ларининг туркуми билан изоҳланади. Мураккаб электр тизимлардаги кичик тебранишлар таҳлили бўйича ишлаб чиқилган ва соддалаштирилган усулларнинг амалий аҳамияти улардан электр тизимларини лойиҳалаштиришда ҳамда электр энергетика тизимлари диспетчерлик бошқарувида фойдаланилишидан иборатдир.

9

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электр тизимларнинг статик турғунлигини таҳлил қилиниш матрица усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

Ляпунов функциялари, матрица усуллари ва алгоритмлари асосида яратилган статик турғунлик назорати усуллари ва алгоритмлари “Ўзбекэнерго” акциядорлик жамияти “КУЧГЭС” унитар корхонасида жорий қилинган (“Ўзбекэнерго” АЖнинг 2016 йил 15 июлдаги DU-OP-21/2628–сон маълумотномаси). Илмий тадқиқотлар натижалари статик турғунлик захираси кўрсаткичини 1% камайтириш ва ишлаб чиқариш самарадорлигини оширишга хизмат қилади;

киритиш технологияси асосида синтез қилинган ростлагичлар ва кутбларни ўзгартириш алгоритми “Ўзэлтехсаноат” акциядорлик компанияси, «Chirchiq transformator zavodi» акциядорлик жамияти тизимида жорий қилинган (“Ўзэлтехсаноат” АКнинг 2016 йил 14 октябрдаги 04-149-сон маълумотномаси).

Натижада кичик тебранишларни демферланишини ҳисобга олган ҳолда лойиҳалаштирилган ҳар бир ТДТН-25000/110/35 трансформатори чулғамига сарфланадиган хом-ашени ва материалларни 5% иқтисод қилишга эришилади;

генераторлар мутлоқ бурчагига асосланган мураккаб электр тизимидаги кичик тебранишларда ўтиш жараёнларининг математик модели ва муаммоли матрицаси яратишга доир янги илмий техник ечимлар ОТ-Ф5-036 «Энергетикада электромеханик ва гидромеханик ўткинчи жараёнларининг ўзаро боғлиқлик

ларини формаллаштириш» (2007-2011йй.) лойиҳасида электромеханик ўткинчи жараёнларни формаллаштиришда фойдаланилган (Фан ва технологияларни ривожлантиришни мувофиқлаштириш қўмитасининг 2016 йил 26 октябрдаги ФТК-0313/722-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши электромеханик ва гидромеханик ўткинчи жараёнларининг ўзаро боғлиқлик ларини формаллаштириш жараёнини енгиллаштирган ва илмий тадқиқотлар самарадорлигини оширишни таъминлашга хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 12 илмий - техник, шу жумладан 5 халқаро анжуманларда муҳокама қилинган; «Электроэнергетика-2010» ва «Электроэнергетика-2012» Халқаро

илмий-техник анжуманларида, Варна, Болгария, (2010 ва 2012 йй.); Осиё-Тинч океани минтақасининг энергетика бўйича халқаро анжуманида (Пекин, Хитой 2013 ва 2015йй.), Фан, технология ва бошқарув соҳасидаги 10-чи халқаро анжуманида (Куала Лумпур, Малайзия, 2015йй.); Ўзбекистон энерготизими диспетчерлик бошқар-маси илмий семинарида (2016йй.) ва ТошДТУ: «Электр станциялари, тармоқлар ва тизимлари», «Гидравлика и гидроэнергетика», «Электр таъминоти», «Электротехника, электромеханика, электротехнология» кафедраларининг бирлашган семинарида (2016йй.) маъруза сифатида ўқиб эшиттирилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 25 илмий ишлар, шу жумладан 8 таси хорижий нашрларда чоп этилган. Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 15 та илмий иш, жумладан, 2та монография, 2 та мақола хорижий ва

10

13 та мақола республика журналларида нашр қилинган, ҳамда 4 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномаси олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 188 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асослаб берилган, тадқиқот объекти ва предмети кўрсатилган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги белгиланган, олинган натижаларнинг ҳаққонийлиги асосланган, натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очилган, ишнинг амалиётга жорий қилиш ҳақидаги, чоп этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Электр тизимлари кичик тебранишлар муаммоси тадқиқотининг замонавий ҳолати**» деб номланган **биринчи бобида** матрица усуллари, мураккаб электр энергетик тизимлар (ЭЭТ) кичик тебранишлари муаммоларининг замонавий ҳолати бўйича чоп этилган асарларнинг танқидий таҳлили ўтказилган. Ляпунов ва Риккати матрица тенгламаларининг қўлланилиши самарали алгоритмлар ва уларнинг ечиш бўйича рақамли ва таҳлилий усуллар ва дастурлар ишлаб чиқиши муносабати билан кенгайган.

Маълумки, ўзгармас коэффициентли чизиқли дифференциал тенгламалар учун квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси тадқиқот қилинаётган тизимнинг кичик қўзғалишларда турғунлигининг зарур ва етарли шартларини таъминловчи ягона функция ҳисобланади.

Матрица тенгламаларини, жу жумладан кенг амалий қўлланилаётган

тахлилий тенгламаларни ечиш бўйича янги ва ўта самарали усулларга олиб келган тадқиқотларни қайд этиб ўтиш муҳим саналади. Сўнгги 20-25 йилларда Россия олими В.Н. Буков ва унинг илмий мактаби томонидан, нафақат минимал-фазавий, балки номинимал-фазавий тизимларни ҳам ўз ичига олиб, ечиладиган масалалар доирасини кенгайтириш имкониятини берадиган янги матрицавий конструкциялар таклиф этилди. Нолни бўлувчилар, канонизаторлар типдаги матрицавий конструкциялар анъанавийларининг олдида миқдорий ва алгоритмик афзалликларга эга бўлиб, чизиқли динамик тизимлари таҳлили ва синтезининг янги имкониятларини очиб беради.

Замонавий тизимларни киритиш технологияси замонавий усулларининг моҳияти – мураккаб ташкил этилган матрица тизимини анча оддий тизимлар жамлиги билан тасвирлаш ёки талқин қилиш шартларининг расман катъий таърифидан иборатдир.

Электр тизимлари тадқиқотларида тизимларни киритиш технологияси қўлланилаётганлигига ҳал қўп вақт ўтгани йўқ. Кўриб чиқиладиган йўналиш икки қисмдан иборат. Биринчидан, тизимлар назариясининг ечиладиган масаласини муаммоли матрица деб аталадиган ва чизиқли динамик тизим хусусиятлари ҳақидаги барча маълумотларга эга бўлган махсус конструкция-

11

ланадиган матрица кўринишида тизимнинг тасвирлаш. Иккинчидан, бу ҳолат бўйича танлаб олинган, тадқиқот қилинаётган тизим ва образ деб номланувчи исталган хусусиятли тизим узатма функцияларининг (операторларини) ўхшашлиги учун зарур ва етарли шарт ҳисобланган детерминант нисбатлардир.

Электр тизимлари тенгламаларининг матрица коэффицентлари ўзгаришлари шартларида ечиш усуллари ишлаб чиқилди ва уларнинг алгоритми тузилди.

Қўп машинали электр тизимларининг статик турғунлиги ва чизиқли динамик тизимлар кичик тебранишларининг тадқиқотлари усуллари таққослама баҳолаш мураккаб динамик тизимларнинг ўтқинчи режимларини ўрганиш учун матрица усуллари ортиб бораётган аҳамиятини кўрсатади. Бунда Ляпунов теоремалари электроэнергетика тизимлари статик турғунлигини тадқиқот қилиш учун назарий асос ҳисобланади.

Диссертациянинг **«Замонавий матрица назарияси ва бошқаришнинг автоматик тизимларининг танланган қоидалари»** деб номланган **иккинчи бобида** матрицалар ва автоматик бошқарув тизимларининг янги, замонавий назарияси бўйича танланма низомлар келтирилган.

Матрица тенгламаларини ечиш учун қўлланиладиган усуллар, ўнг қисмни ҳисобга олган ҳолда, матрицанинг қаторлари ёки устунлари билан элементар амаллар бажаришга олиб келади. Бундай ўзгаришлар бошланғич матрицани махсус турдаги матрицага кўпайтиришга эквивалент ҳисобланади. Буларга матрицаларни нолга бўлувчи (ўнг ва чап), канонизаторлар (ўнг, чап ва йиғма), математик объектнинг ички хусусиятлари чуқур таҳлилини ўтказиш имконини берувчи, улар моделларининг алгебравий хусусиятларини

белгилаб берувчи, тадқиқот қилинаётган тизимларнинг матрицавий тасаввурининг нокоммутативлиги киради.

Машхур Россия олими В.Н. Буков ва унинг ходимлари томонидан матрицалар нолини бўлувчиларининг мазмуни очиб берилган, канонизация усули асосида матрицавий тенгламаларни ечиш усули ишлаб чиқилди.

$A_{m \times n}$ – $(m \times n)$ ўлчам матрица ва $\text{rank} A = r$ рангга эга бўлсин. Ушбу матрица учун қуйидаги тушунчалар киритилади: $(m-r)$ ўлчами A^L нол матрица сининг чап бўлувчиси; $(n-r)$ ўлчамли ва $(n-r)$ рангдаги A^R нол матрицанинг ўнг бўлувчиси; $(r \times m)$ ўлчамли A^L чап канонизатор-матрица; ўнг канонизатор- $A^R(n \times r)$ ўлчамли матрица ва $(n \times m)$ ўлчамли йиғма канонизатор- A матрица.

$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ва $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ матрицалар нолининг бўлувчилари ихтиёрий матрица қаторлар ва устунларининг чизикли боғлиқ комбинацияларини

шакллантиради. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ва $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ матрицалар A матрица барча чизикли мустақил комбинацияларни, қаторлари ва устунларини тавсифлайди.

Қуйидаги тенгликлар ҳаққонийдир:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Шундай қилиб, ҳар қандай A матрицани максимал ранги нолнинг чап $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ва ўнг $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ бўлувчиларини ҳамда A матрицанинг ички тузилишини

12

тавсифловчи $A \sim$ йиғма канонизаторини ўз ичига олувчи ноягона матрицалар учлиги таққослаш мумкин, яъни

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, (1) \text{ Матрицанинг (1) кўриниши матрица}$$

канонизацияси деб аталади. Кичик қўзғалишларда динамик тизим таҳлили ва синтези вазифаларини тадқиқот қилиш, унинг ҳолатлар бўшлиғини ташкил

этувчи n
 $x \in R$ ва

доимий коэффициентли матрицалар билан тенгламаларни ечиш орқали аниқланадиган ҳолатларни аниқлаш билан боғлиқ:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (2) \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

Бунда A, B, C, D – тадқиқот қилинаётган тизимнинг, ростлагичлар ва ташқи таъсирлар (кириш), кириш ва чиқиш параметрлари боғлиқлиги билан аниқланадиган матрицалар. (2), (3) “кириш-ҳолат-чиқиш” тизими тенгламалари номини олди.

Тизим таҳлили турғунликнинг зарур ва етарли шартларини таъминловчи квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси билан тадқиқ (автоном чизиқли) қилиниши мумкин. Ушбу ишда ҳолат ва Ляпунов тенгламасини ечиш бўйича матрицали усуллар келтирилган.

Диссертациянинг «**Электр тизимлари статик турғунлигининг квадратик формадаги Ляпунов функциялари асосида соддалаштирилган мезонини яратиш**» деб номланган **учинчи бобида** квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси асосида ЭЭТ статик турғунлигининг зарурий ва етарли шартларини таъминловчи, соддалаштирилган мезони ишлаб чиқилган.

Электр тизимлари кичик тебранишларининг масалалари, статик турғунликнинг маълум бузилиш турлари тадқиқ қилинаётган тизимнинг характеристик тенгламасини Гурвиц мезонлари асосида таҳлил қилиш орқали кўриб чиқилган:

$$a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + s^n = 0$$

Статик турғунликнинг бузилиш турлари тизимнинг характеристик тенгламалари коэффициентлари ($a_i > 0$ – зарурий шартлар) ва Гурвицнинг барча аниқловчиларининг мусбатлик ($\Delta_i > 0$ – етарли шартлар) билан ифода қилинган турғунликнинг зарурий ва етарли шартлари талабларидан келиб чиққан ҳолда аниқланган. Кўриниб турибдики, характеристик тенгламанинг даражаси n ортиб бориши билан, қўйилган масалани ечиш мураккаблашади.

Ушбу масаланинг ўзи квадратик шаклдаги Ляпунов функцияларидан фойдаланиб, мавжуд ҳисоблаш афзалликлари билан анча ихчам ечилиши мумкин.

Электр тизими математик моделини ёзамиз:

$$\dot{x} = Ax$$

$$A = \Delta A \quad (4)$$

бунла A – тадқиқ қилинаётган тизимнинг ҳолат матрицаси ёки ўз динамикаси матрицаси деб аталувчи, доимий элементли ($n \times n$) тартибдаги матрица, x , Δx – ЭЭТ режими параметрларининг вектор-устуни ва уларнинг кичик оғишлари.

13

Квадратик шаклни белгилаймиз

$$Q = Q^T, \quad Q_{ii} = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

$$Q = Q^T$$

Бу ерда Q – квадратик шаклдаги коэффициентлари хали маълум бўлмаган квадратли матрица; X^T – жойи алмаштирилган X (вектор-қатор). (5) функция квадратик шаклдаги Ляпунов функцияси деб аталади. (4) тенгламаларни ҳисобга олган ҳолда, ушбу функциянинг ҳосиласини топамиз:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= A^T Q + Q A \\ &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^T Q + Q \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\vdots \quad \begin{vmatrix} z_{22} & z_{23} & \dots & z_{2n} \\ z_{32} & z_{33} & \dots & z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n2} & z_{n3} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0. \quad (10)$$

Таҳлил шуни кўрсатдики, Q матрицанинг биринчи асосий минорнинг мусбатлиги қуйидаги кўринишдаги режим ва тизим параметрларига боғлиқ:

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (11)$$

бунда z_0, z_1 – режим ва тизим параметрларига боғлиқ бўлган ифодалар.

(11) шартни бажариш учун қуйидаги талаблар бажарилиши шарт: $\begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (12)$

$$= \begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (13)$$

$$\begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (14)$$

(12)-(14) мусбатлигининг бузилиши қуйидаги шартларда содир бўлиши мумкин:

- генератор ортиқча юкланганда, яъни машина $90^\circ (c_1 < 0)$ бурчак ортида ишлаганда;

- электр узатиш линияси ($X_d > X_{\text{сети}} > X'_d$) индуктив қаршилиги сиғимлар билан компенсацияланганда;

- бурчакларнинг қийматлари нолга яқин бўлганда, яъни салт юришга яқин бўлган режимларда. $P_d \approx 0$ ва $r = 0$ бўлганда, (14)дан қуйидагини оламиз:

$$\begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} z_{23} & z_{24} & \dots & z_{2n} \\ z_{33} & z_{34} & \dots & z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n3} & z_{n4} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} > 0, \quad (15)$$

таҳлил эса (15) мусбатлиги қуйидаги ҳолатда бузилиши мумкин эканлигини кўрсатади:

$$\begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} < \begin{vmatrix} z_{11} \\ z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} z_{23} & z_{24} & \dots & z_{2n} \\ z_{33} & z_{34} & \dots & z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n3} & z_{n4} & \dots & z_{nn} \end{vmatrix}^2 > 0. \quad (16)$$

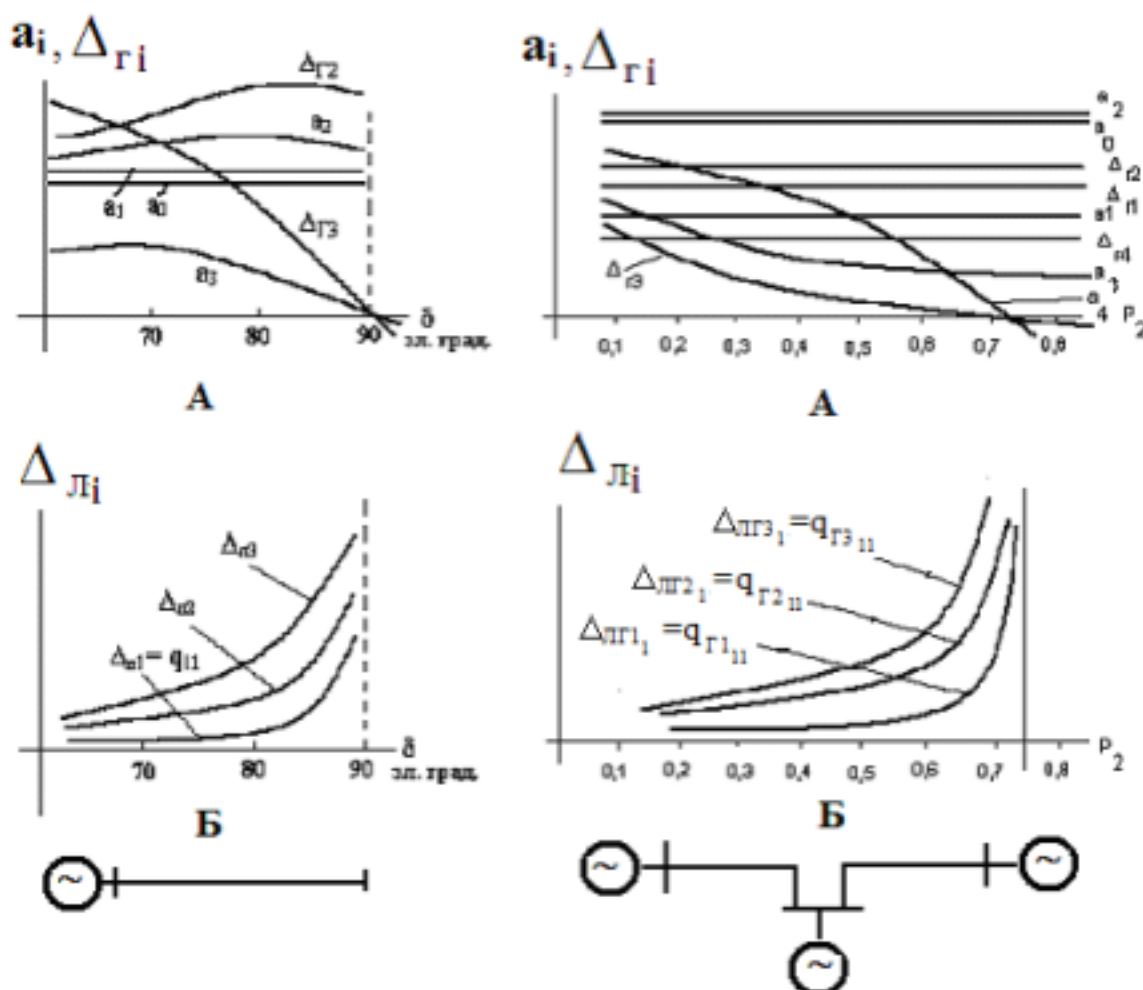
Назарий ва ҳисоб таҳлили шуни кўрсатадики, (15) умумий ҳолатда мураккаб ифодага эга Q (10) квадратик шаклдаги матрицаларнинг $\Delta_{Li} > 0$ ($i=2-n$) юқори асосий минорлари мусбатлиги худди ўша (12)-(14) шартларнинг бажарилишига олиб келади.

Шундай экан, квадратик шаклдаги матрица биринчи асосий минори мусбатлигининг бузилиш шартларидан, электр тизими статик турғуниги гининг маълум (нодаврий бузилиш, ўз ўзидан қўзғалиш, ўз ўзидан тебраниш) бузилиш шартлари келиб чиқади.

Демак, Ляпуновнинг иккинчи усули билан олинган электр тизими статик турғунлигининг бузилиш шартлари, умумлаштирилган Гурвиц шартлари асосида аввал топилган шартларга мос келади.

Таклиф этилган усулнинг афзаллиги шундан иборатки, статик турғунликнинг барча турдаги бузилишлари биринчи $q_{11} > 0$ асосий минорда

Мазкур факт турли мураккабликдаги электр тизимининг ҳисоб экспериментал тадқиқотлари натижалари билан ҳам тасдиқланган.



1-расм. Оддий ва уч генераторли тизим учун Гурвиц аниқловчиси (А) ва Ляпунов матрицавий тенгламаси квадратик шакли асосий минорлари (Б) ўзгаришлари

1-расмда мисол тариқасида оддий ва уч генераторли электр тизими учун характеристик тенгламалар коэффициентлари (12) ва квадратик шаклдаги матрицалар минорлари (16) ўзгариши келтирилган. Характеристик тенгламалар коэффициентларининг ўзгаришлари ЭЭТ режими оғирлашганда турли тавсифга эга бўлади. Квадратик шаклдаги минорларининг ўзгариши бир хил тусга эга. Кўриниб турибдики, мазкур хусусият тадқиқот қили наётган тизимнинг мураккаблигига боғлиқ эмас.

Айтганимизни ҳисобга олганда ЭЭТ мувозанати ҳолати турғун лигининг таҳлилини $\Delta_{11} > 0$ билан аниқлаш ҳамда уни зарурий ва етарли шартларини таъминловчи статик турғунликнинг амалий мезони сифатида кўриб чиқиш мумкин.

Мураккаб ЭЭТ тадқиқот қилинганда бу сезиларли даражадаги ҳисоб лаш самарасини беради, чунки характеристик тенглама коэффициентлари ва

юқори тартибдаги аниқловчилар ҳисобланмайди.

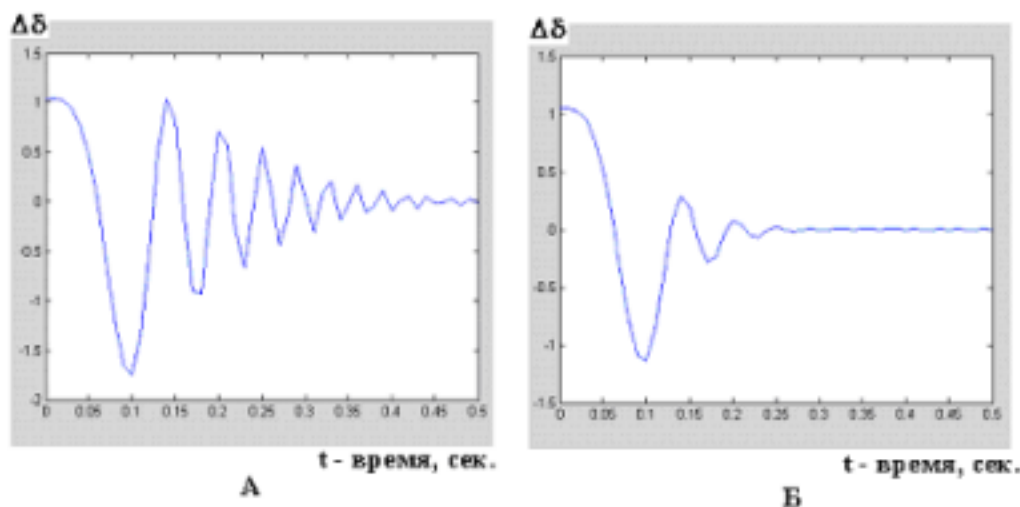
Синтез масаласи ўзгарувчан ҳолат тенгламаларини Ляпунов ва Риккати матрицавий тенгламасини ечиш негизида бажарилган:

16

$$\begin{aligned} & \ddot{\delta} + \ddot{\delta} = \ddot{\delta} + \ddot{\delta} \approx 12\ddot{\delta} - 6\ddot{\delta} + \ddot{\delta}^2 \ddot{\delta}^{2-1} 12\ddot{\delta} + \\ & 6\ddot{\delta} + \ddot{\delta}^2 \ddot{\delta}^2 = \Lambda \ddot{\delta}(\ddot{\delta}). \quad (17) \text{ Бунда } \Lambda = \ddot{\delta} + \ddot{\delta} = 12\ddot{\delta} - \\ & 6\ddot{\delta} + \ddot{\delta}^2 \ddot{\delta}^{2-1} 12\ddot{\delta} + 6\ddot{\delta} + \ddot{\delta}^2 \ddot{\delta}^2 \end{aligned}$$

I, h – бирлик матрица ва ҳисоб қадами.

Матрицавий тенгламаларни ечиш асосида синтезланган кўзғалишнинг автоматик ростлагичлари ўрнатилган ЭЭТ ўтиш жараёнини тадқиқотлари 2-расмда келтирилган:



2-расм. Оддий ЭЭТдаги ўтиш жараёни: А-ростлагич ўчирилган; Б-кучланишнинг, ротор бурчаги ва биринчи ҳосиланинг оғишини сезувчи синтезланган ростлагич мавжуд: $k_{0\delta} = 11.57$, $k_{0U} = 16.22$, $k_{1\delta} = -0.3854$.

Диссертациянинг «Квадратик формадаги Ляпунов функциялари асосида мураккаб электр тизимлари турғунлиги чегарасини аниқлаш усулини яратиш» деб номланган тўртинчи бобида икки фундаментал усул - квадратик шаклдаги Ляпунов функциясини ва тугун кучланишлар тенгламаларини биргаликда қўллаш асосида мураккаб ЭЭТ статик турғунлигининг чегарасини аниқлаш усули ишлаб чиқилган.

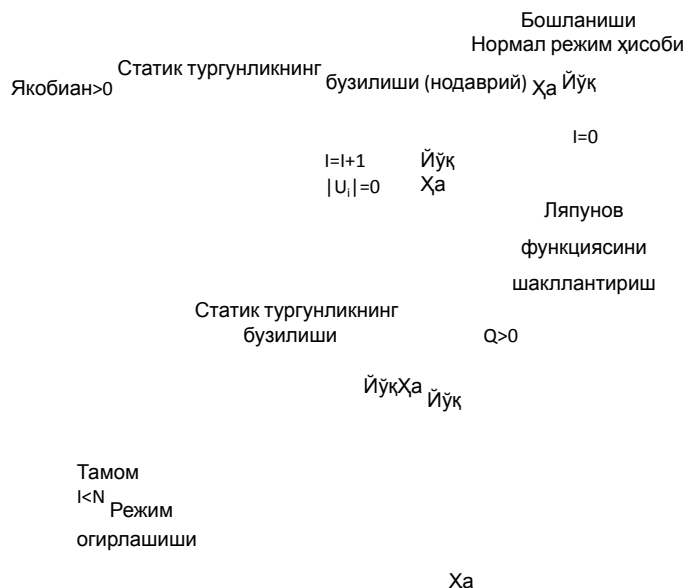
Бунда мураккаб ЭЭТ статик турғунлиги квадратик шаклдаги Ляпунов матрицавий тенгламаси (7) ва тугун кучланишлар тенгламаларини биргаликда ечиш асосида тадқиқот қилинади:

$$\ddot{\delta} + \ddot{\delta} = \ddot{\delta} + \ddot{\delta} + \ddot{\delta}^2 \ddot{\delta}^2 + \ddot{\delta}^* \dots \quad (18)$$

Мураккаб ЭЭТ статик турғунлиги тадқиқот қилинганда дастлаб тугун кучланишлар тенгламалари асосида белгиланган режим ҳисобланади, ҳар бир k тугун учун кучланиш U_k ва унинг δ_k аргументи аниқланади, ва сўнгра ҳар бир генератор учун, мазкур маълумотлардан фойдаланиб, квадратик шаклдаги Q матрица биринчи, асосий q_{11j} минорининг мусбатлиги текширилади (3-расм)

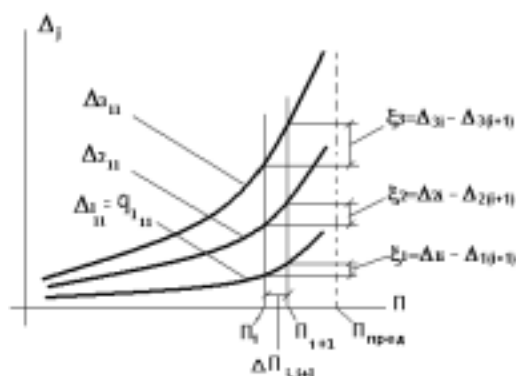
Режим параметри оғирлашишда q_{11j} максимал ўзгарган генератор ЭЭТ статик турғунлигининг бузилиши нуқтаи назаридан хавфли ҳисобланади. Шунга қараб, мазкур оғирлашишда чегарага бошқаларга қараганда тезроқ яқинлашадиган генератор аниқланади. Таклиф этилаётган усул билан мураккаб ЭТТ статик турғунлигини тадқиқот қилиш, «генераторлар-шина» схемаларини тадқиқот қилишга айланиб қолади.

17



3-расм. Квадратик шаклдаги Ляпунов функциясини ва тугун кучланишлар тенгламаларини биргаликда қўллаш алгоритми

Мазкур алгоритмни таҳлилий жиҳатдан уч генераторли тизим мисолида кўрсатиш мумкин. 4-расмда q_{11j} ўзгаришларнинг – тадқиқ қилинаётган уч генераторли электр тизимининг ҳар бир генератори учун Q_j квадратик шаклининг матрицалари биринчи элементларининг q_{11j} ўзгариши келтирилган (бунда $j=1-3$).



4-расм. Уч генераторли электр тизими асосий биринчи минорларининг ўзгариши

18

Мураккаб электр тизим режими оғирлашганда турли генераторлар учун квадратик шаклдаги минорларнинг $(\xi_j, j=1-3)$ ўзгариши турлича бўлади. (19) умумлаштирилиб, қуйидагича ёзилиши мумкин:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,j} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \\ \Delta P_{i,j} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \end{aligned} \quad (19)$$

бунда $\Pi \rightarrow U, f, I, \delta$ – ЭЭТ режими параметрлари, улар бўйича оғирлаштириш натижасида тадқиқот қилинаётган тизим генераторлари минорларининг ўзрашини аниқланиш мумкин, j -(19) ҳисоблаб чиқариладиган генератор, i ЭЭТ режимининг берилган параметрлари учун жорий оғирлаштириш қадами.

$\xi_i > 0$ шarti квадратик шакл учун доимо бажарилади, шунинг учун тенг сизликларни қатъий бажариш ушбу шарт билан чегараланиш мумкин:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \\ \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \end{aligned} \quad (20)$$

Демак, j генераторнинг, ва натижада ЭЭТ статик турғунлигини таъминлаш учун, қуйидаги шартни бажариш талаб этилади:

$$\Delta P_{i,j} > 0. \quad (21)$$

Олинган натижалар асосида мураккаб электр тизимлари статик турғунлигини тадқиқот қилиш қуйидаги алгоритмининг таклиф этиш мумкин. Мураккаб ЭТТ берилган режимнинг Π параметри бўйича оғирлашишига қараб, ҳар бир генератор ёки ажратилган гуруҳлар учун ҳар бир i қадамда (21) шарт таққосланади:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,j} &> \dots \Delta P_{i,j+1} \\ \Delta P_{i,j} &> \dots \Delta P_{i,j+1} \end{aligned} \quad (22)$$

бунда n -статик турғунлиги текшириладиган генераторлар ёки станциялар сони. Тизим режимининг белгиланган параметри ўзгарганда квадратик шакл коэффициентлари матрицаси асосий биринчи минорининг ўзрашиши, максимал бўлгани генератор статик турғунлиги бузилиши нуқтаи назаридан энг хавфлиси ҳисобланади:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,j} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \\ \Delta P_{i,j} &= \Delta P_{i,j} - \Delta P_{i,j+1} \end{aligned} \quad (23)$$

Бу натижа қўзғалишни, тезликни ва бошқа параметрларни автоматик ростлагичлар коэффициентлари ростлаш орқали мазкур генераторнинг ўтиш жараёнини бошқаришни ташкил этиш, ҳамда унинг статик турғунлигини таъминлаш имконини беради. Энерготизимдан фойдаланиш амалиёти учун мазкур натижанинг аҳамияти каттадир.

1-жадвалда таклиф этиладиган ва мавжуд усуллар самарадорлигини ЭЭТ статик турғунлиги таҳлил қилинганда кўпайтириш ва бўлиш операцияларининг зарур миқдори билан ифодаланган натижалари келтирилган.

**ЭЭТ статик турғунлиги аниқлаш учун таклиф этилаётган ва мавжуд усуллар
самарадорлигини таққослама тахлили**

1 –жадвал

Микдорий усул		Генераторлар сони				
		1	3	7	15	70
	D – ажратиш	$0,23 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	$0,33 \cdot 10^8$	
2	QR-алгоритм бўйича ўз қийматларининг ҳисоби	$3,85 \cdot 10^3$	$0,27 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^8$
3	Арнольди усули бўйича ўз қийматларининг ҳисоби				$2,1 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^7$
4	Тугун кучланишлари ва квадратик шаклдаги Ляпунов функцияларининг биргаликда қўлланилиши	$0,7 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^7$

Диссертациянинг «**Тизимлар киритиш технологияси - кичик тебранишларни тадқиқот усули**» номли **бешинчи бобида** мураккаб ЭЭТ статик турғунлигини янги усул – тизимлар киритиш технологияси билан тадқиқот қилиш натижалари келтирилган.

Тизимлар киритиш технологияси – аввалам бор, замонавий алгебра ютуқларига асосланган, маълум шартлар асосида мураккаб ташкил этилган (кўп ўлчамли тизимни чуқурроқ тадқиқот қилиш учун қулай ва оддийроқ тизимлардан фойдаланиш назарияси, усуллари ва усулларининг универсал жамлигидир.

Тизимлар киритиш технологиясини қўллаш учун учта босқични кетма кет бажариш зарур: муаммоли матрицани шакллантириш, ўхшашликларни шакллантириш ва ҳисоблар олиб бориш.

Операторлик шаклида (2) ва (3) тенгламалар қуйидагича тақдим этилади:

$$p_x(p) A_x(p) B_u(p), \quad = + \quad (24)$$

$$y(p) C_x(p).$$

=

Умумий ҳолда (24)да тенгламалар сони улардаги ўзгарувчанларнинг сони билан мос тушмайди. Бу (24) мос келадиган Розенброк тизимли

матрицаси

$$\begin{array}{|c|c|} \hline \text{? ?} & \text{? ?} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{? ?} & \text{? ?} & \text{? ?} & \text{? ?} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|} \hline \text{? ?} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|} \hline \text{? ?} \\ \hline \end{array}$$

$$\diamond\diamond 0, (25)$$

$((n+m)x(n+s))$, ўлчамга эга, яъни тўғри бурчакли ҳисобланади, бу эса квадратли матрицалар учун мўлжалланган аниқловчиларни, қийматлар ва векторларни ҳисоблаш каби анъанавий воситалардан фойдаланишга йўл қўймайди. Ушбу тўсиқни бартараф этиш учун (25) - тенглама қуйидаги кўринишдаги, (24) тенглама билан намоён этиладиган, масаланинг мазмунига таъсир кўрсатмайдиган, ростловчи ўхшашлик деб аталувчи тенглама билан тўлдирилади:

$u(p) = u(p)$, (26) (26) ўхшашлик ростлагич кўринишидаги ташки таъсирини тавсифлайди.

20

Натижада блок-матрица кўрнишидаги тенгламалар тизимини ҳосил қиламиз:

$$\begin{array}{ccccccc}
\begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \\ \diamond \diamond \end{array} & - & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \\ \diamond \diamond \end{array} & & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \\ \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & 0 & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & 1 \\
\begin{array}{c} \diamond \diamond \end{array} & - & \begin{array}{c} \diamond \diamond \end{array} & & & & & & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} \\
0 & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & & 0 & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & \cdot & = & & & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} \\
- & \begin{array}{c} \diamond \diamond \end{array} & & 0 & \begin{array}{c} \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \end{array} & & & & & \begin{array}{c} \diamond \diamond \end{array}_0 \\
& & & & & & & & & \cdot \quad (27)
\end{array}$$

Стационар чизиқли динамик тизимнинг умумлаштирилган тенгламасини (27) қўидаги кўринишда ёзамиз:

$$\Omega(p)Y(p) = U(p), \quad (28) \text{ бунда}$$

$$\begin{array}{c} \diamond\diamond\diamond\diamond = \\ -\diamond\diamond\diamond\diamond - \end{array} \quad \begin{array}{l} \diamond\diamond\diamond\diamond - \diamond\diamond 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond} - \diamond\diamond \\ 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond} 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond} \diamond\diamond\diamond\diamond, \end{array} \quad (29)$$

- тадқиқот қилинаётган тизимнинг $(n+m+s) \times (n+m+s)$ ўлчамли муаммоли квадрат матрицаси ҳисобланади.

Киритишнинг ўхшашлиги қуйидаги кўринишга эга

бўлади: $b(p)$

$$\beta(p)\Omega(p)\alpha(p)^{-1} = a(p)$$

$$\omega(p) = f(p) =, \quad (30)$$

бунда бу $\Omega(p)^{-1}$ - тадқиқот қилинаётган тизимнинг $(n+m+s) \times (n+m+s)$ ўлчамли реверсив муаммоли матрицаси (репроматрица) деб аталади, $\alpha(p)$, $\beta(p)$, $\omega(p)$ – киритиш матрицалари ва тегишли тизим образи. Киритиш матрицалари асосида (30) нисбат Репроматрицани чизикли қайта ўзгартириб образга таққослайди. Ишда фақат скаляр образга киритиш кўриб чиқилган.

Проматрица $\Omega(p)$ билан тавсифланадиган чизиқли кўп алоқали тизим, агар кўйидаги тенглама:

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21}$$

$$a_{11}a_{22} \dots a_{100} - a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = 0, \quad (31)$$

ёки куйидаги тенглик

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} + a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21} + a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = 0. \quad (32)$$

Бажарилса $a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$ ва $a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$ ($a_{12}a_{21}$) киритиш матрицалари конструкцияларини ёрдамида скаляр образга киритилади.

Ростланувчи кўп алоқали динамик тизим узатма функцияси – скаляр образини куйидаги кўринишда олиш мумкин:

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} \quad (33)$$

$$\text{бунда } a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$$

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} (a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21}) \quad (34)$$

- скаляр образ узатма функциясининг махражи, ўзига хос аниқловчи бўлиб, тадқиқот қилинаётган тизимнинг кутбларини аниқлайди; $a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} =$

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21} + a_{12}a_{21}(a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} + a_{12}a_{21}) - a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$$

$$a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} (a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21}) \quad (35)$$

- тадқиқот қилинаётган тизимнинг нолини аниқлайдиган скаляр образ узатма функциясининг сурати.

21

(31)-(35) формулаларини қайта ҳосил қилиш асосида, бутун узатма матрицасини ҳисобламасдан тизимнинг алоҳида узатма функцияларини топиш мумкин. Бунинг учун $a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$ ва $a_{12}a_{21}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100}$ ($a_{12}a_{21}$) киритиш матрицаларини куйи даги кўринишда бериш зарур:

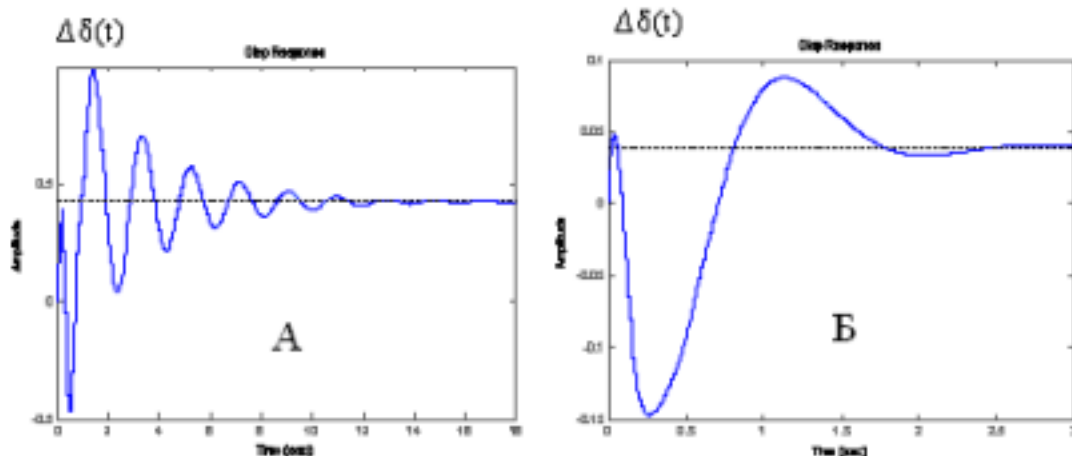
$$a_{11}a_{22} = 0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0$$

$$a_{12}a_{21} = 0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0, \quad (36)$$

яъни i ва j жойлардагина ноль бўлмаган элементлар жойлашган, тизимнинг узатма функциясини $f_{ij}(p)$ куйидаги формула бўйича ҳисоблаш мумкин: $a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = \det a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21} + a_{12}a_{21}\Delta_{11}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - \det(a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21})$

$$\det(a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - a_{12}a_{21}), \quad (37)$$

бунда $\Delta_{11}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} = a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}a_{55}a_{66}a_{77}a_{88}a_{99}a_{100} - (j,i)$ жойдаги элементлар бир бўлган билан (sxm) ўлчамли нотўлиқ матрица.



5-расм. Қўзғалиш ростланишининг тадқиқот қилинаётган тизимнинг ўтиш жараёнига таъсири: А: $k_{0\delta} = 0$; $k_{1\delta} = 0$; $k_{0u} = 10$ ед.; Б: $k_{0\delta} = 0$; $k_{1\delta} = 0.2$ ед., $k_{0u} = 0$

Келтириб ўтилган ифодалар асосида турли мураккабликдаги ЭЭТ ўтиш жараёнларининг ҳисоб-экспериментал тадқиқотлари олиб борилди. 5-расмдан кўриниб турибдики, фақат ҳосилали бурчак бўйича каналнинг мавжудлиги ўтувчан жараёнлар сифатининг кескин ошишига ва ўтувчан жараён вақтининг бир неча мартага қисқаришига олиб келади.

Электр тизими режимларини ва турғунлигини бошқариш масалалари ҳал қилинганда, тегишли бошқариш қонуни билан, $\ddot{\delta} = -\frac{1}{T}(\delta - \delta_0)$ ростлагич танланган ҳолда электр тизим моделининг кутбларини ўзгартириш зарурати юзага келади.

Тизимлар киритиш технологияси қийматлари номаълум бўлиб қолиши мумкин бўлган қолган кутбларни қатъий ўзгартирмаган ҳолда талаб этилган кутбни силжитиш мумкин.

Мазкур масала В.Н. Буков, М.Ш. Мисриханов ва В.Н. Рябченко томонидан ечилган. Дастлабки тизим матрицаларининг махсус чизиқли қайта ўзгаришидан фойдаланиш - кутбларни силжитишнинг таклиф этилаётган усулининг асоси ҳисобланади.

Режим параметрларини ва электр тизимини киритиш

$$\ddot{\delta} = \ddot{\delta}_0 + \ddot{\delta}_1 = \ddot{\delta}_0$$

ҳолатлари бўшлиғининг тенгламаларини тузиш

♦♦

$$\text{Стратификация } \ddot{\delta} = \ddot{\delta}_0 - \ddot{\delta}_1$$

Матрицали конструкцияларни аниқлаш

$$\ddot{\delta}_0, \ddot{\delta}_1, \ddot{\delta}_2 \sim \ddot{\delta}_3$$

$$\text{Шартни текшириш: } \ddot{\delta}_0 = 0_{\ddot{\delta}_0} (\ddot{\delta}_0 - \ddot{\delta}_1), \Theta B \neq 0$$

Шарт бажариляпти

Кўплаб регуляторларни шакллантириш $\diamond\diamond \diamond\diamond$ Кутбнинг кўчишини танлаш $\diamond\diamond$ ва текширишШартни текшириш: $\diamond\diamond(\diamond\diamond - \diamond\diamond\diamond\diamond)\diamond\diamond^{\diamond\diamond} = 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond(\diamond\diamond-\diamond\diamond)}$

Шарт бажариляпти Шарт бажарилмаяпти

Силжиган кутбни ва режим параметрларини тўхтатиш ва
чиқариш**6-расм. Электр тизимининг кутбларини силжитиш алгоритми.**

Кутбларни бошқариш учун қуйидаги шартларни бажариш зарур ва етарлидир:

$$\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond^{\diamond\diamond} = 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond(\diamond\diamond-\diamond\diamond)} \quad (38) \text{ ва}$$

$$\diamond\diamond(\diamond\diamond - \diamond\diamond\diamond\diamond)\diamond\diamond^{\diamond\diamond} = 0_{\diamond\diamond\diamond\diamond(\diamond\diamond-\diamond\diamond)}, \quad (39)$$

бунда Θ –стратификация матрицаси, $^R \Theta_{\text{эса}}$ – ушбу матрица нолининг ўнг бўлувчиси.

Стратификация матрицаси қуйидаги тенглик билан аниқланади: $\diamond\diamond$. (40)

$$\diamond\diamond = \diamond\diamond - \diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond$$

Бунда A ўз динамикаси матрицаси ҳар қандай λ ўзагининг қийматини (41) асосида ҳосил бўлган регулятор билан, ҳолат бўйича тескари алоқа ёрдамида қолган барча кутбларни ўзгартирмасдан исталган $\lambda_{\text{ж}}$ га ўзгартириш мумкин:

$$\diamond\diamond_{\diamond\diamond} = (\diamond\diamond\diamond\diamond \sim \diamond\diamond - \diamond\diamond_{\text{ж}} + \diamond\diamond^{\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond})\diamond\diamond, \quad (41)$$

(40) формула бўйича ҳисобланадиган Θ стратификация матрицаси учун қуйидаги шарт бажарилади:

$\Theta B \neq 0$, (42) бунда η - ўлчамнинг $(s\text{-rank}(\Theta B)) \times 1$ ёки ихтиёрий сон матрицаси.

23

ЭЭТ кутбларини силжитиш алгоритми 6-расмда келтирилган. Ишда синтезланган регулятор негизда электр тизими моделларининг кутбларини силжитиш мисоли келтирилган.

Позицион идеаллаштиришда i синхрон генератори электрмагнит қуввати тенгламаси сосида, генераторларнинг мутлоқ бурчакларига нисбатан ечилган мураккаб ЭЭТ модели ишлаб чиқилган:

$$\diamond\diamond_{\Gamma\diamond\diamond} = \diamond\diamond_{\diamond\diamond}^2 \diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond +$$

$$\diamond\diamond_{\diamond\diamond} \diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond\diamond \sin(\diamond\diamond_{\diamond\diamond\diamond\diamond} -$$

п синхрон генераторларда мавжуд бўлган (2)-(3) ҳолатлар тенгламалари асосида тадқиқ қилинаётган мураккаб электр тизимининг $(4n \times 4n)$ ўлчамли A_{Σ} ўз динамикаси ва $4n \times n(k-m)$ ўлчамли B_{Σ} киришнинг умумлаштирилган матрицаси куйидаги кўринишга эга:

[illegible]

Мазкур модель, n микдордаги генераторларли турли автоматик ростлагич эга бўлган ҳар қандай мураккабликдаги ЭЭТ учун ҳаққонийдир. Мисол тариқасида, уч генераторли ЭЭТ учун, генераторлар ва мутлоқ бурчак оғишларига таъсирланадиган ($\Delta\delta_i$) автоматик ростлагич мавжуд бўлганда (ΔU_{Gi}) кучланишлари ва уларнинг ҳосилалари қуйида A_3 , B_3 матрицалари келтирилган:

$$\begin{array}{l}
000:100:000:000 \\
000:010:000:000 \\
000:001:000:000 \\
\vdots \vdots \vdots \vdots \\
-\diamond_{11}\diamond_{12}\diamond_{13}:000:-\diamond_1 \\
\diamond_{\diamond_1}\diamond_{\diamond_1} \\
\diamond_{\diamond_1}00:000 \\
\diamond_{21}-\diamond_{22}\diamond_{23}:000:0-\diamond_2 \\
\diamond_{\diamond_2}\diamond_{\diamond_2} \\
\diamond_{\diamond_3}:000 \\
\diamond_3= \\
\vdots \vdots \vdots \vdots \\
000:000:1\diamond_{\diamond_1}00:-1\diamond_{\diamond_1}00 \\
000:000:0\diamond_{\diamond_2}0:0-1\diamond_{\diamond_2}0 \\
000:000:0\diamond_{\diamond_3}:00-1\diamond_{\diamond_3} \\
\diamond_{\diamond_1}\diamond_{\diamond_1} \\
\diamond_{\diamond_1}00:\diamond_{\diamond_1} \\
\diamond_{\diamond_1}00:000:-1\diamond_{\diamond_1}00
\end{array}$$

$$\begin{matrix} 0 & \diamond \diamond & \underline{0 \diamond \diamond 2} \\ \diamond \diamond \diamond \diamond 2 & 0 : 0 & \diamond \diamond \underline{1 \diamond \diamond 2} \end{matrix} \quad (44)$$

$$\begin{matrix} & & \diamond \diamond \diamond \diamond 2 & 0 : 0 & 0 & 0 : 0 & -^1 & \diamond \diamond \diamond \diamond 2 & 0 \\ & & & & & & & & \\ 0 & 0 & \diamond \diamond & \underline{0 \diamond \diamond 3} & & & & & \diamond \diamond \diamond \diamond 3 : 0 & 0 & 0 : 0 & 0 & -^1 & \diamond \diamond \diamond \diamond 3 \\ & & & & \diamond \diamond \diamond \diamond 3 : 0 & 0 & \diamond \diamond & \underline{1 \diamond \diamond 3} & & & & & & \end{matrix}$$

24

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$$

$$\begin{matrix} & & & & & & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ B_3 = & & & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 & & & & & & \\ & & & & & & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 & & & & & & \\ & & & & & & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 & & & & & & \\ & & & & & & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 & & & & & & \end{matrix}$$

(45)

$$\begin{matrix} & & & & & & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ & & & & & & \diamond \diamond \underline{0 \cup \Gamma 1} \cdot T_{e1} & T_{e1} & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ & & & & & & \diamond \diamond \underline{1 \cup \Gamma 1} & & \\ & & & & & & & & \\ 0 \ 0 & \diamond \diamond & \underline{0 \cup \Gamma 2} & & & & \diamond \diamond \underline{1 \cup \Gamma 2} & & \\ & & & & & & T_{e2} & 0 \ 0 \\ & & & & & & T_{e2} & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & \diamond \diamond \underline{1 \cup \Gamma 3} & T_{e3} \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 & \diamond \diamond & \underline{0 \cup \Gamma 3} & & & & T_{e3} & \end{matrix}$$

Олинган тенгламалар ва уларнинг матрицалари, ростловчи курилмаларни ҳисобга олган ҳолда кўп машинали ЭЭТ моделининг қулай шакллантирилишини таъминловчи, Ляпунов матрица тенгламаси ва тугун кучланишлар тенгламалари билан биргаликда қўллаш учун мослаштирилган. Матрицалар кесилган ҳолда бўлгани сабабли, уларнинг ҳисоблаш самараси

Ишда тизимларни киритиш технологиясидан фойдаланиш учун мураккаб ЭЭТ математик моделининг тенгламалари шакллантирилган. Бунда ўз динамикаси ва юқорида олинган кириш матрицалари қўйидаги кўринишга

ва уларнинг ўлчамлар қуйидагига тенг: A_{Σ} матрица $(2n \times 2n)$ ўлчамга эга, кириш матричаси эса B_{Σ} - $(2n \times n)$.

$$\begin{array}{rcl}
& & \Delta_{\diamond\diamond}^1 0 \dots 0 \\
& \Delta_{\diamond\diamond}^1 0 \dots 0 \diamond\diamond \diamond\diamond \dots \diamond\diamond 1 & \\
\diamond\diamond \diamond\diamond \dots \diamond\diamond 1 & & \Delta_{\diamond\diamond}^2 \dots 0 0 \\
& & \diamond\diamond \diamond\diamond \dots \diamond\diamond 2 \\
\Delta_{\diamond\diamond}^2 \dots 0 & & \\
\diamond\diamond = & 0 \diamond\diamond \diamond\diamond \dots \diamond\diamond 2 & \\
& \dots & \\
& \dots & \dots \dots \\
\dots & \dots & 0 \quad 0 \quad \dots \dots \quad \Delta_{\diamond\diamond} \diamond\diamond \\
\dots & \Delta_{\diamond\diamond} \dots \diamond\diamond &
\end{array}
, (47)$$

Δ_{22}^{22} - мазкур генераторнинг мутлоқ

оғишларининг каналлари бўйича i генераторнинг автоматик ростлагич кучайтириш коэффициентлари. Зарурат туғилганда, режимнинг ҳар қандай параметри оғишларини бурчак ва генераторнинг кучланишлари оғишлари орқали ифода этиш мумкин.

Ростланувчи электр тизимининг умумий проматрицаси Ω куйидаги кўринишда:

25

Биринчи генератори $\Delta\delta_1=f(t)$ бурчагининг ўзгариш жараёни:

$$\begin{aligned}
\Delta_{11} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{12} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} 1 \end{vmatrix} = 1; \\
\Delta_{21} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{23} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0; \\
\Delta_{31} &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{32} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0; \\
A: \quad \Delta_{11} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{12} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} 1 \end{vmatrix} = 1; \\
\Delta_{21} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{23} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0; \\
\Delta_{31} &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{32} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0; \\
B: \quad \Delta_{11} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{12} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} 1 \end{vmatrix} = 1; \\
\Delta_{21} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{23} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0; \\
\Delta_{31} &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{32} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix} = 0;
\end{aligned}$$

Шундай қилиб, тизимларни киритиш технологиясининг асоси ҳисобланувчи матрицалар канонизацияси усули ёрдамида, электр тизимининг ихтиёрий ташқи қўзғалишлардан чиқишининг инвариантлик шартлари асосланган. Ушбу масалани ечиш учун тегишли ростлагич синтезланган. Инвариантлик назариясининг маълум низомлари билан олинган натижаларнинг таққослама таҳлили уларнинг ҳаққонийлигини тасдиқлайди.

ХУЛОСА

Квадратик шаклдаги Ляпунов функцияларини ва тизимларини киритиш технологиясини қўллаган ҳолда маълум ва ишлаб чиқилган матрицали усуллар ва алгоритмлар негизида мураккаб электр тизимларининг статик турғунлиги юзасидан ўтказилган назарий ва ҳисоб экспериментал тадқиқотлар қуйидаги хулосаларга келиш имконини беради.

1. Квадратик шаклдаги Ляпунов функциялари чизиқли динамик тизимларга кирадиган электр тизими тадқиқот қилиш учун самарали усул сифатида тавсия қилинади.

27

2. Квадратик шаклдаги Ляпунов функциялари матрицалари асосий минорларининг мусбатлиги асосида олинган электр тизим статик турғунлигининг бузилиш шартларининг Гурвиц мезонлари шартларига мослиги исботланган.

3. Олинган назарий ва ҳисоб натижалариквадратик шаклдаги Ляпунов функцияси биринчи, асосий минорининг мусбатлик $q_{11j} > 0$ шартини таҳлил қилиш усули билан ЭЭТ статик турғунлигини тадқиқ қилиш ва уни, ЭЭТ статик турғунлигининг зарурий ва етарли шартларини таъминловчи амалий (соддалаштирилган) мезони сифатида кўриб чиқиш имконини беради. Мазкур минор тадқиқот қилинаётган тизим ўз динамикаси матрицаларининг элементларидан шакллантирилади.

4. Квадратик шаклдаги Ляпунов функциялари ва тугун тенгламалардан биргаликда фойдаланиш, статик турғунлик бўйича чегарага биринчи яқинлашадиган генератор (станция)ни аниқлаш имконини беради. Бошқа генераторларга нисбатан j-чи генератор учун ростланувчи параметр бўйича

квадратик шаклдаги матрица асосий биринчи минорининг ҳосиласи максималлиги яъни $dq_{11j} d\Pi \rightarrow \max$, мазкур ғоянинг математик шарти ҳисобланади. Ушбу ҳолатда мураккаб ЭЭТ статик турғунлиги чегарасини тадқиқ қилиш «генераторлар-шина» схемасининг тадқиқотиغا айланади.

5. Тизимлар киритиш технологияси асосида ўтиш жараёнларнинг ҳар қандай тавсифларини тўлиқ тасвирлаб ва белгилаб берадиган, шунингдек параметрлар кичик тебранишларида электр тизими динамик жараёнларни тадқиқ қилиш имконини берадиган мураккаб ростланмайдиган ва ростланадиган ЭЭТ проматрицалари ишлаб чиқилди.

6. Тизимлар киритиш технологияси негизида ЭЭТда турғунликни ва тебранишларнинг демпферланишини таъминловчи ростлагичлар туркумини таҳлилий жиҳатдан тасвирлаб берадиган мураккаб электр тизимининг ростлагичини синтезлаш модели таклиф этилди.

7. Тизимлар киритиш технологияси негизида ЭЭТ статик турғунлигининг таҳлили бўйича ўтказилган ҳисоб-экспериментал тадқиқотлар олинган натижаларнинг электр тизимларда амалда фойдаланиб келинаётган усуллар натижаларига мос келганлигини кўрсатди ва бу ишлаб чиқилган моделларнинг мавжуд моделларга ўхшашлигини тасдиқлаб берди.

8. Мураккаб ЭЭТ кичик тебранишларини тадқиқот қилиш учун фойдаланилиши мумкин бўлган синхрон генераторлар мутлоқ бурчакларининг руҳсат этилган оғишларига нисбатан математик модели ишлаб чиқилди. Мураккаб электр тизимлари кичик тебранишларининг мазкур моделидан, U_i тугунлари кучланишлари модуллари ва балансловчи тугунига нисбатан δ_i мутлоқ бурчагини ва уларнинг аргументларини белгилаб берувчи тугун кучланишлар тенгламалари билан биргаликда фойдаланиш тавсия этилди.

МИРЗАБАЕВ АКРАМ МАХКАМОВИЧ

**МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА
СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**05.05.02 – «Электротехника. Электроэнергетические станции, системы.
Электротехнические комплексы и установки»
(технические науки).**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

ТАШКЕНТ – 2016

29

Тема докторской диссертации зарегистрирована за №30.06.2015/B2015.2.T540 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-странице Научного совета по присуждению ученой степени доктора наук 14.07.2016.Т.02.01 при Ташкентском государственном техническом университете и ООО «Научно-технический центр» по адресу www.tdtu.uz.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на

веб-странице по адресу www.tdtu.uz и Информационно-образовательном портале «ZIYONET».

Научный консультант: Аллаев Кахрамон Рахимович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Чемборисова Наиля Шавкатовна

доктор технических наук, профессор

(Российская Федерация)

Игамбердиев Хусан Закирович

доктор технических наук, профессор

Соколов Валерий Константинович

доктор технических наук, профессор,

Ведущая организация: Координационный диспетчерский центр «Энергия»

Защита диссертации состоится «___» _____ в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета _____ при Ташкентском государственном техническом университете и обществе ограниченной ответственности «Научно-технический центр» по адресу: 100095, г Ташкент, ул Университетская, 2.

Тел : (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер-02). Адрес: 100095, Ташкент, ул.Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2016 года
(протокол рассылки № «___» _____ от 2016 г.).

Х.М. Муратов

Председатель совета по присуждению ученой степени доктора наук, д.т.н., профессор.

О.О. Зарипов Ученый секретарь научного совета по присуждению ученой степени доктора наук, д.т.н., доцент.

Т.Ш.Гайибов Заместитель председателя научного семинара

при Научном совете по присуждению ученой степени доктора наук, д.т.н., профессор

30

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мировой практике в сфере обеспечения устойчивой работы электроэнергетических систем (ЭЭС) ведущее место занимает создание высокоэффективных систем управления технологическими процессами выработки и потребления электроэнергии с привлечением интеллектуальных технологий. Одной из наиболее актуальных задач, стремительно развивающихся современных ЭЭС является обеспечение их статической устойчивости на основе обработки и анализа оперативных данных в режиме реального времени. В этом направлении в ведущих странах мира пристальное внимание уделяется совершенствованию систем управления для обеспечения устойчивости электроснабжения.

троэнергетических систем с учетом колебаний режимных параметров. «Затраты на создание интеллектуальных электрических систем, в том числе Smart Grid составляют: США – 7,1 трлн., Китай – 7,3 трлн., Япония – 0,8 трлн. долларов. Использование системы Smart Grid к 2020 году позволит США сэкономить около 1.8 трлн. долларов¹».

В Республике Узбекистан проводятся широкомасштабные мероприятия по эффективной организации производства электроэнергии и повышению устойчивости ЭЭС. В этой сфере, в том числе, по переоснащению высокоэффективным оборудованием, парагазовой и газотурбинной технологиями, обеспечивающими выработку электроэнергии, по разработке эффективных систем управления технологическими объектами и совершенствованию методов и алгоритмов исследования систем управления, проводится ряд исследовательских работ.

В мире пристальное внимание уделяется разработке более совершенных методов определения устойчивости электрических систем, матричных методов и алгоритмов, позволяющих управлять режимными свойствами электроэнергетических систем с учетом современных устройств управления. В этой области осуществление целенаправленных научных исследований является приоритетной проблемой, при этом весьма актуальны исследования в следующих направлениях: разработка матричных методов и алгоритмов определения устойчивости электрической системы с учетом автоматических регуляторов синхронных генераторов, разработка упрощенных критериев определения предельного режима по устойчивости сложных ЭЭС, разработка модели синтеза автоматических регуляторов возбуждения на базе технологии вложения систем. Проводимые научные исследования по вышеуказанным научно-исследовательским направлениям подтверждает актуальность темы данной диссертации.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-2343 от 5 мая 2015 года «О Программе мер по

¹ Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы. Автоматизация и ИТ в энергетике, март 2011 № 3 (20) www.transform.ru: 31.05.2011 г.

сокращению энергоемкости, внедрению энергосберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015-2019 годы», в постановлении Кабинета Министров №238 от 13 августа 2015 года «Об утверждении положения о республиканской комиссии по вопросам энергоэффективности и развития возобновляемых источников энергии», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение». **Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации².** Научные

исследования, направленные на разработку и создание систем контроля по обеспечению устойчивости сложных электроэнергетических систем, осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, в том числе Princeton University, Iowa State University, Rutgers University, Massachusetts Institute of Technology, University of Baltimore (США), University Of Cambridge (Англия), Royal Institute Of Technology (Швеция), Dresden University of technology (Германия), The China Electric Power Research Institute (Китай), Siemens (Германия), ABB (Швеция), Московский энергетический институт, Военно-воздушная инженерная академия, (Россия), Ташкентский государственный технический университет, ООО «Научно-технический центр» (Узбекистан).

В результате исследований, проведенных в мире по совершенствованию моделей и алгоритмов процессов управления сложными ЭЭС на базе теории электрических систем и матриц получены ряд научных результатов, в том числе: создан программный комплекс EUROSTAG, предназначенный для исследования оптимальных режимов и устойчивости электрических систем (Electricite de France, Франция); создана система управления переходными процессами при малых колебаниях (SMAS3, Испания), разработана система управления устойчивостью и балансами мощностей динамических систем SIMPOW (ABB, Швеция); созданы программы расчета режимов сложных ЭЭС (MASS, Канада), на базе IT технологий созданы автоматизированные комплексы диспетчерского управления ЭЭС (Siemens, Германия, Московский энергетический институт, Россия, DYNSTACK, Австралия).

В мире по разработке интеллектуальных методов управления устойчивостью ЭЭС на базе достижений современных компьютерных технологий проводятся исследования, по ряду приоритетных направлений, в том числе: разработка методов решения задач устойчивости сложных линейных динамических систем на основе современных новых матричных конструкций и систем автоматического управления – функции Ляпунова в

² Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации осуществлялся на основе: <http://www.dissercat.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.ifti.ru>. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем// Калуга, 2006. –720с. и других источниках.

квадратичной форме и технологии вложения систем; создание высокоэффективных алгоритмов управления устойчивости ЭЭС; создание математических моделей переходных процессов на базе абсолютных углов генераторов.

Степень изученности проблемы. Решением теоретических и практических задач анализа устойчивости ЭЭС, в том числе задач разработки алгоритмов и программ расчетов устойчивости при малых возмущениях параметров режима, занимались известные ученые: П.С. Жданов, А.А. Горев, А.С. Лебедев, В.А. Веников, Ю.Н. Руденко, Н.И. Соколов, В.А. Строев, И.В. Литкенс, В.П. Васин, С.А. Савалов, Е.Д. Карасёв, О.В. Щербачёв, Ю.П.

Горюнов, Э.С. Лукашов, В.В. Бушуев, Л.А. Кощев, И.А. Груздев, А.Х. Есипович, А.А. Юрганов, Б.И. Аюев, Р. Anderson, A. Fouad, P. Kundur, R. Byerly, R. Bennon, D. Sherman, D. Wong, G. Rogers, B. Porretta, Х.Ф. Фазилов, Т.Х. Насиров, Ж.А. Абдуллаев, В.К. Соколов, К.Р. Аллаев и многие другие.

Исследования, посвященные современной теории матриц и их применению в управлении систем, велись со стороны ряда учёных в том числе: Ф.Р. Гантмахером, Р.Е. Калманом, А.А. Красовским, А.А. Вороновым, Х. Розенброком, Ю.Н. Андреевым, М. Уонем, П.Л. Фалбой, Х.Д. Икрамовым, В.Н. Рябченко, Е.М. Смагиной, Н.Р. Юсупбековым, Х.З. Игамбердиевым и получены весьма важные результаты, созданные алгоритмы и программные комплексы используются при проектировании и управлении сложными динамическими системами.

Исследования, связанные с решением вопросов обеспечения устойчивости и управления режимами сложных ЭЭС проводили ряд ученых, в том числе: В.Н. Буков, В.А. Андреюк, Н.И. Воропай, М.Ш. Мисриханов. Анализ показывает, что на сегодняшний день матричные методы и алгоритмы применяются для анализа устойчивости электроэнергетических систем и здесь получены определенные положительные результаты. Вместе с тем, в научных публикациях в недостаточной мере рассмотрены вопросы разработки эффективных алгоритмов управления ЭЭС и систематизации современных подходов, а также проблемы создания и дальнейшего совершенствования эффективных методов, моделей и алгоритмов процессов управления с учетом регулирующих устройств.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета по темам: № 2016001 - «Разработка и анализ современных методов автоматического управления нормальными, переходными и оптимальными режимами электроэнергетических систем» (2015-2017 гг.); А-3-96-“Оптимальное управление нагрузками потребителей энергосистемы Республики Узбекистан” (2015-2017 гг.); Ф-2-33-“Определение энергетической эффективности и законов математического моделирования насосных станций” (2012-2016 гг.).

Целью исследования является разработка матричных методов и алгоритмов анализа малых колебаний сложных электрических систем, разработка упрощенных методов определения пределов статической устойчивости и синтез моделей регуляторов на базе технологии вложения систем.

Задачи исследования:

системный анализ существующих методов и алгоритмов исследований статической устойчивости управляемых электроэнергетических систем; разработка упрощенных методов и алгоритмов исследований малых

колебаний сложных электроэнергетических систем на основе функций Ляпунова и современной теории матриц;

разработка методов исследований малых колебаний регулируемых электрических систем на основе технологии вложения систем; разработка модели синтеза регуляторов электрической системы, позволяющих обеспечить устойчивость и демпфирование колебаний при малых возмущениях параметров режима сложной ЭЭС;

расчетно-экспериментальные исследования и сравнительный анализ статической устойчивости регулируемых сложных электрических систем на основе разработанных матричных методов и алгоритмов.

Объектом исследования являются системы управления режимными параметрами электроэнергетических систем в условиях воздействия малых колебаний.

Предмет исследования матричные методы, алгоритмы и математические модели анализа малых колебаний регулируемых электрических систем, методы синтеза моделей автоматических регуляторов возбуждения на базе технологии вложения систем.

Методы исследований. В процессе исследования использованы теории электрических систем, синтеза и матриц, методы автоматического управления и технологии вложения систем, методы малых колебаний динамических систем и линейной алгебры.

Научная новизна исследования заключается в следующем: разработан упрощенный критерий статической устойчивости электрической системы на основе функций Ляпунова в квадратичной форме, состоящий в положительности первого, главного минора матрицы квадратичной формы ($q_{11} > 0$), обеспечивающего необходимые и достаточные условия устойчивости ЭЭС;

разработан метод совместного применения функций Ляпунова в квадратичной форме и уравнений узловых напряжений, позволяющий свести исследование статической устойчивости сложной электрической системы к простой схеме - «генератор-шины»;

разработана проматрица сложной электрической системы на основе технологии вложения систем, позволяющая исследовать динамические свойства ЭЭС;

34

разработан алгоритм перемещения полюсов, обеспечивающий устойчивость и демпфирование колебаний параметров режима при малых возмущениях в ЭЭС;

создан алгоритм синтеза математической модели регуляторов на основе технологии вложения систем, обеспечивающая устойчивость и демпфирование малых колебаний в ЭЭС.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: доказана адекватность условий статической устойчивости электрической

системы при малых возмущениях параметров режима, полученных на основе функций Ляпунова в квадратичной форме, условиям, доставляемым критериями Гурвица;

разработан на базе первого главного минора матрицы квадратичной формы Ляпунова упрощенный критерий статической устойчивости, позволяющий ускорить процесс определения устойчивости ЭЭС и облегчить диспетчерское управление;

разработана математическая модель переходных процессов при малых колебаниях в сложной электрической системе на базе абсолютных углов генераторов;

разработана математическая модель и проматрица сложной ЭЭС на основе технологии вложения систем, позволяющая исследовать динамические свойства электроэнергетических систем;

разработан алгоритм и программа перемещения полюсов и синтеза регуляторов, обеспечивающих устойчивость и демпфирование малых колебаний электроэнергетических систем.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования подтверждается применением апробированных на практике методов теории электрических систем и моделирования систем автоматического управления, обосновывается совпадением результатов расчетно-экспериментальных исследований малых колебаний сложных ЭЭС полученных применением разработанных матричных методов с результатами, полученными классическими методами.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в разработанности математической модели исследований малых колебаний регулируемой сложной ЭЭС, позволяющей на базе матричного уравнения Ляпунова упрощенно определить условия нарушения статической устойчивости, обеспечивающей и необходимые, и достаточные ее условия и математической модели сложной ЭЭС относительно абсолютных углов генераторов системы. Разработан класс регуляторов сложной электрической системы, сконструированных аналитически на основе технологии вложения систем.

Практическая значимость разработанных упрощенных методов анализа малых колебаний в сложных электрических системах, заключается в их использовании при проектировании электрических систем и диспетчерском управлении ЭЭС.

Внедрение результатов исследования. Результаты исследований по разработке матричных методов и алгоритмов анализа статической устойчивости электрических систем:

методы контроля статической устойчивости на базе функций Ляпунова матричных методов и алгоритмов внедрены в УП «КУЧГЭС» АО «Узбекэнерго» (Справка от 11 июля 2016 года № DU-OP-21/2628 АО «Узбекэнерго»). Результаты научно-исследовательских работ позволяют

увеличить предел статической устойчивости на 1% и обеспечить повышение эффективности производства;

алгоритм синтеза регуляторов и перемещение полюсов на базе технологии вложения систем внедрен на АО «Chirchiq transformator zavodi» акционерной компанией «Узэлтехсаноат» (Справка от 14 октября 2016 года № 04-149 АК «Узэлтехсаноат»). В результате получено 5% экономия сырья и материалов обмоток каждого трансформатора ТДТН-2500/110/35 спроектированного с учетом демпфирования малых колебаний;

математическая модель и проматрицы сложных ЭЭС на базе абсолютных углов генераторов использованы в фундаментальном проекте ОТ-Ф5-036 «Формализация взаимосвязи электромеханических и гидромеханических переходных процессов в энергетике» (2007-2011гг.) для формализации электромеханических переходных процессов. (Справка от 26 октября 2016 года № ФТК-0313/722 Комитета по координации развития науки и технологий). Внедрение научных результатов облегчает формализацию электромеханических и гидромеханических переходных процессов и повышает эффективность научно-технических исследований.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертации доложены на 12 научно-практических конференциях, в том числе на 5 международных: Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика-2010» и «Электроэнергетика-2012», Варна, Болгария, (2010 и 2012гг.); Международной конференции по энергетике Азиатско-Тихоокеанского региона (Пекин, Китай 2013 и 2015гг.); 10 Международная конференция в сфере науки, технологий и управления (Куала Лумпур, Малайзия, 2015г.); на заседании научного семинара по защите докторских диссертаций при Диспетчерском управлении энергосистемой Узбекистана (2016г.); объединенном семинаре кафедр ТашГТУ – «Электрические станции, сети и системы», «Гидравлика и гидроэнергетика», «Электроснабжение», «Электротехника, электромеханика, электротехнология» (2016г.).

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 25 научных работ, в том числе 8 в зарубежных изданиях. Из них 15 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе: 2 монографии, 2 статьи в иностранных и 13 в республиканских журналах, а также получены 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Объем диссертации составляет 188 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, определены объекты и предметы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Показаны научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость результатов, приведены документы внедрения результатов исследования, сведения об апробации работы, данные по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «Современное состояние проблемы исследования малых колебаний электрических систем» проведен критический анализ публикаций современного состояния проблемы исследований малых колебаний (статическая устойчивость) сложных ЭЭС матричными методами.

Применение матричных уравнений Ляпунова и Риккати расширяется в связи с разработкой эффективных алгоритмов и программ численного и аналитического методов их решений. Известно, что функция Ляпунова в квадратичной форме для линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами является единственной, которая обеспечивает и необходимые, и достаточные условия устойчивости исследуемой системы при малых возмущениях.

Особо следует указать на интенсивные исследования, приведшие к новым и чрезвычайно эффективным методам решений матричных уравнений, в том числе аналитических, получающих широкое практическое применение. В последние 20-25 лет российским ученым В.Н. Буковым и его научной школой предложены новые конструкции матриц, позволяющие расширить круг решаемых задач, в число которых входят не только минимально фазовые, но и неминимально-фазовые системы. Матричные конструкции типа делители нуля, канонизаторы раскрывают новые возможности анализа и синтеза линейных динамических систем, имеющие численное и алгоритмическое преимущества исследований перед традиционными.

Сутью современного метода исследования динамических систем – технологии вложения систем – является формально строгое определение таких условий, при которых поведение сложно организованной матричной системы описывается или интерпретируется поведением совокупности более простых систем.

Технологию вложения систем в исследованиях электрических систем начали применять относительно недавно. Рассматриваемое направление сводится к двум позициям. Во-первых, это представление решаемой задачи теории систем в виде некоторой специально конструируемой матрицы, назы-

ваемой проблемной матрицей (или кратко - проматрицей) и содержащей всю исчерпывающую информацию о свойствах линейной динамической системы. Во-вторых, это детерминантные соотношения, удовлетворение которых является необходимым и достаточным условием для тождества выбранных по

желанию передаточных функций (операторов) исследуемой системы и системы с желаемыми свойствами, называемой образом. Известны также разработки методов и алгоритм решения уравнений электрической системы в условиях локальных изменений их матриц коэффициентов. Проведенная сравнительная оценка методов исследований малых колебаний линейных (линеаризованных) динамических систем, к которым относятся и вопросы статической устойчивости многомашинных электрических систем, показывает возрастающую роль матричных методов, ввиду их вычислительной эффективности и ориентированности к применению для описания переходных режимов сложных динамических систем. При этом теоретической основой исследования статической устойчивости математической модели электроэнергетических систем являются теоремы Ляпунова. **Во второй главе диссертации «Избранные положения современной теории матриц и систем автоматического управления»** приведены избранные положения современной теории матриц и систем автоматического управления, используемые в работе. Показано, что применяемые для решения матричных уравнений методы сводятся к выполнению последовательно элементарных преобразований строк или столбцов матрицы решаемой задачи, с учетом правой части. Такие преобразования эквивалентны произведению исходной матрицы на матрицы специального вида. К ним относятся алгебраические объекты и матрицы, такие как делители нуля матриц (правый и левый), канонизаторы (правый, левый и сводный), а также некоммутативность матричного представления исследуемых систем, которые определяют алгебраические особенности их математических моделей, позволяющих провести глубокий анализ внутренних свойств объекта.

Известным российским ученым В.Н. Буковым и его сотрудниками раскрыто содержание делителей нуля матриц, разработан метод решения матричных уравнений на основе метода канонизации, что позволяет проводить аналитические исследования матричных уравнений.

Пусть $A_{m \times n}$ – матрица размера $(m \times n)$ и имеет ранг r . Для этой матрицы вводятся понятия: левого делителя нуля-матрица размера $(m-r)$; правого делителя нуля-матрица размера $(n-r)$ и ранга $(n-r)$; левый канонизатор - матрица размера $(r \times m)$; правый канонизатор - матрица размера $(n \times r)$ и сводный канонизатор- $A^{\sim}$ - матрица размера $(n \times m)$.

Делители нуля матрицы $(L$ и $R)$ формализуют все линейно зависимые комбинации строк и столбцов произвольной матрицы A . Особностью матриц L и R является то, что они характеризуют все линейно не зависимые комбинации строк и столбцов матрицы A .

Справедливы следующие тождества:

нения системы ($a_i > 0$ – необходимые условия) и всех определителей Гурвица ($\Delta_{\Gamma_i} > 0$ – достаточные условия). Очевидно, что с увеличением степени характеристического уравнения n решение поставленной задачи усложняется. Данная задача может быть решена более компактно, с существенными вычислительными преимуществами, если использовать функции Ляпунова в квадратичной форме. Математическая модель автономной стационарной системы, к которой могут быть приведены и дифференциальные уравнения первого приближения электрической системы имеет вид:

39

$$\ddot{x} = A\dot{x} + \Delta x$$

$$\ddot{x} = A\dot{x} + \Delta x; \quad (4)$$

где A – матрица порядка $(n \times n)$ с постоянными элементами, называемая матрицей состояния или матрицы собственной динамики исследуемой электрической системы, x , Δx – вектор-столбец параметров режима ЭЭС и их малые отклонения.

Зададимся квадратичной формой:

$$V = \frac{1}{2} \dot{x}^T Q \dot{x} + \frac{1}{2} x^T P x = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

$$Q = Q^T, \quad P = P^T$$

здесь Q – пока не известная квадратная матрица коэффициентов квадратичной формы; X^T – транспонированный X (вектор-строка). Функция (5) называется функцией Ляпунова в квадратичной форме. Найдём производную этой функции с учетом уравнений (4):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{x}^T Q \dot{x} + x^T P \dot{x} = \dot{x}^T Q \dot{x} + x^T P (A\dot{x} + \Delta x) = \dot{x}^T Q \dot{x} + x^T P A \dot{x} + x^T P \Delta x \\ &= \dot{x}^T Q \dot{x} + \dot{x}^T P^T A x + x^T P \Delta x = \dot{x}^T (Q + P^T A) \dot{x} + x^T P \Delta x \\ &= \dot{x}^T (Q + P^T A) \dot{x} + x^T P \Delta x = \dot{x}^T (Q + P^T A) \dot{x} + x^T P \Delta x \end{aligned}$$

$$A^T Q + Q A = -C, \quad (7) \text{ где } C - \text{единичная матрица.}$$

Уравнение (7) называется матричным уравнением Ляпунова. Если матрица Q положительно определенная, то

$$\dot{V} < 0$$

$$x^T Q x > 0$$

$$\dot{V} < 0, \quad (8)$$

когда $V > 0$, т.е. происходит убывание функции V , а, следовательно, траектория системы стремится к началу координат, решение автономной линейной системы (4) асимптотически устойчиво.

Таким образом, если одновременно выполняются неравенства

$$V > 0 \text{ и } V < (9)$$

в некоторой области пространства переменных $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, включающей начало координат, то положение равновесия в начале координат асимптотически устойчиво. Это положение сформулировано в теореме Ляпунова.

Следует отметить, что это единственный случай, когда функция Ляпунова в квадратичной форме обеспечивает и необходимые, и достаточные условия асимптотической устойчивости исследуемой линейной динамической системы и поэтому является универсальной, т.е. она одинакова для любых динамических систем, если система описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Во всех остальных случаях формируемые функции Ляпунова обеспечивают только достаточные условия устойчивости, и при этом они строятся методом проб и ошибок, т.е. не являются универсальными. Из-за этого применение функций Ляпунова для нелинейных систем ограничено.

Основная задача заключается в решении матричного уравнения Ляпунова (7) и определении Q , как положительно определенной матрицы. Элементы матрицы Q определяются из (7) решением $n(n+1)/2$ уравнений, где n - число уравнений. При этом условия устойчивости ди-

40

намической системы, полученные на основе решения (7), должны быть строго эквивалентны решениям, полученным из критериев Гурвица. Согласно теореме Сильвестра, необходимыми и достаточными условиями положительной определенности матрицы Q и, следовательно, устойчивости исследуемой системы (4) при малых возмущениях является положительность главных диагональных миноров данной матрицы: $\Delta_{11} \Delta_{22} \dots \Delta_{nn}$

$$\Delta_{11} = a_{11} > 0, \Delta_{22} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \Delta_{nn} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} > 0. \quad (10)$$

Исследование статической устойчивости простой электрической системы функцией Ляпунова в квадратичной форме, с учетом переходных процессов в обмотке возбуждения синхронного генератора показывает, что положительность первого, главного минора матрицы Q зависит от параметров режима и системы в виде:

$$\Delta_{11} = a_{11} = \frac{z_0}{z_1^2} > 0; \quad (11)$$

где z_0, z_1 – выражения, зависящие от параметров режима и системы. В работе показано, что для выполнения условия (11) требуется, чтобы a_{11}

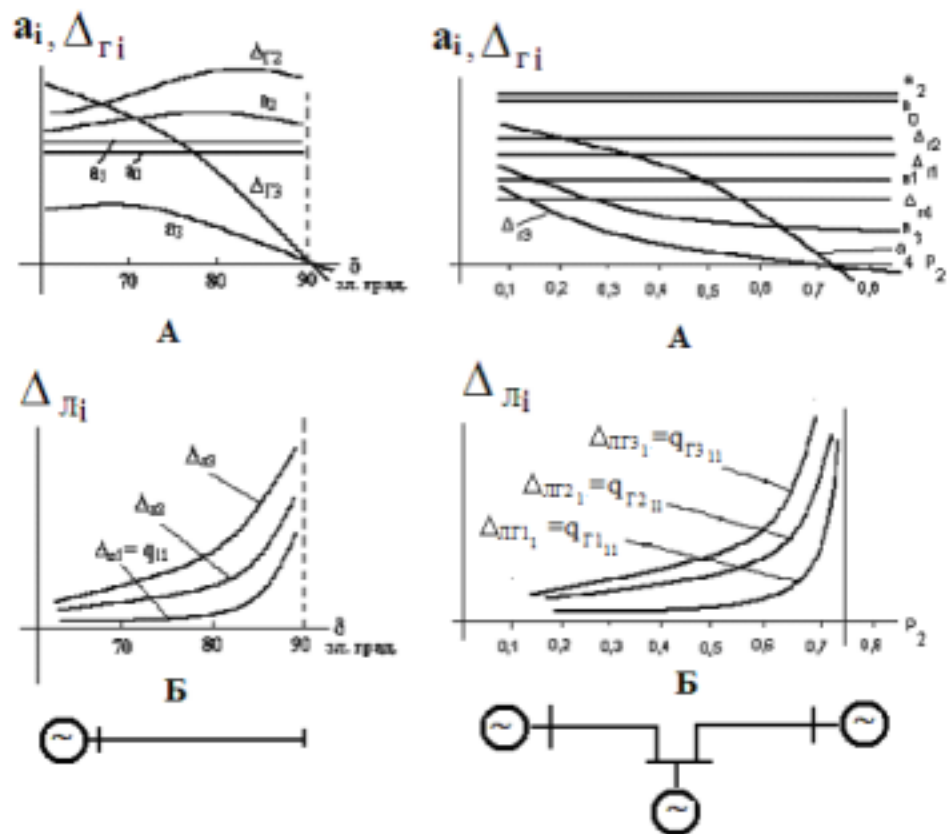


Рис.1.

Изменения коэффициентов характеристического уравнения и определителей Гурвица (А) и главных миноров квадратичной формы матричного уравнения Ляпунова (Б) для простой и трехгенераторной системы

В качестве примера на рис.1. приведены сравнительные кривые изменения коэффициентов характеристического уравнения и миноров матрицы квадратичной формы, рассчитанные для простой и трехгенераторной электрической системы. Изменения коэффициентов характеристического уравнения имеют различный характер при утяжелении режима ЭЭС. В то же время, изменению главных миноров матрицы квадратичной формы присущ одинаковый характер. Из характера кривых очевидно, что данное свойство не зависит от сложности исследуемой системы.

Учитывая сказанное, можно предложить упрощенное исследование статической устойчивости ЭЭС анализом положительности только $q_{11} > 0$ и рассматривать это как практический критерий статической устойчивости системы, обеспечивающий и необходимые, и достаточные ее условия.

42

При исследовании сложных ЭЭС это дает существенный вычислительный эффект, так как отпадает многократный расчет определителей высокого порядка или коэффициентов характеристического уравнения.

В работе решена задача синтеза регулятора на базе уравнений переменных состояния с решением матричного уравнения Ляпунова и матричного уравнения Риккати.

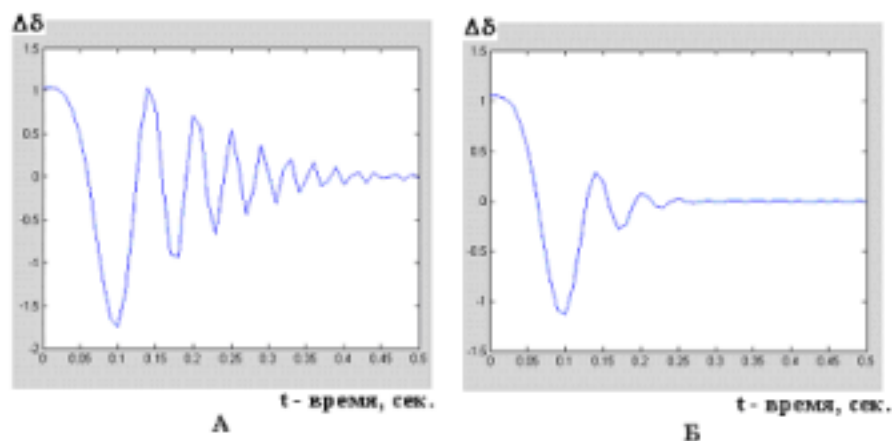


Рис.2. Переходные характеристики в простой ЭЭС: А – регулятор отключен; Б – имеется АРВ-с, реагирующей на отклонение напряжения, угла ротора и первой производной угла с синтезированными коэффициентами усиления: $k_{0\delta} = 11.57$ ед., $k_{0U} = 16.22$ ед., $k_{1\delta} = -0.3854$ ед.

На рис. 2 представлены переходные характеристики ЭЭС при синтезированных параметрах АРВ, построенные на основе решения матричного уравнения

$$\ddot{\delta} + \dot{\delta} = \ddot{\delta}_0 + \ddot{\delta}_1 \delta + \ddot{\delta}_2 \dot{\delta} + \ddot{\delta}_3 \delta^2 \approx 12\ddot{\delta}_0 - 6\ddot{\delta}_1 \delta + \ddot{\delta}_2 \delta^2 - 12\ddot{\delta}_3 + 6\ddot{\delta}_4 \delta + \ddot{\delta}_5 \delta^2 = \Lambda \ddot{\delta}(\ddot{\delta}); \quad (17) \text{ где } \Lambda = \ddot{\delta}_0 + \ddot{\delta}_1 \delta + \ddot{\delta}_2 \delta^2 - 12\ddot{\delta}_3 + 6\ddot{\delta}_4 \delta + \ddot{\delta}_5 \delta^2;$$

I, h – единичная матрица и шаг расчета, соответственно.

В четвертой главе диссертации «Разработка метода определения предела статической устойчивости сложной электрической системы на основе функций Ляпунова в квадратичной форме» разработана методика определения предела статической устойчивости сложной ЭЭС на основе совместного применения двух фундаментальных методов – метода функции Ляпунова в квадратичной форме и уравнений узловых напряжений.

Статическая устойчивость сложной ЭЭС при этом исследуется на основе совместного решения матричного уравнения Ляпунова (7) и уравнений узловых напряжений:

$$\ddot{\delta} = \ddot{\delta}_0 + \ddot{\delta}_1 \delta + \ddot{\delta}_2 \delta^2 + \ddot{\delta}_3^* \delta^3. \quad (18)$$

При исследовании статической устойчивости сложных ЭЭС сначала производится расчет установившегося режима на основе уравнений узловых напряжений, определяются напряжение для каждого узла k U_k и ее аргумент δ_k и далее, для каждого генератора, с использованием этих данных, проверяются положительности первого, главного минора q_{11j} матрицы квадратичной формы Q (рис.3).

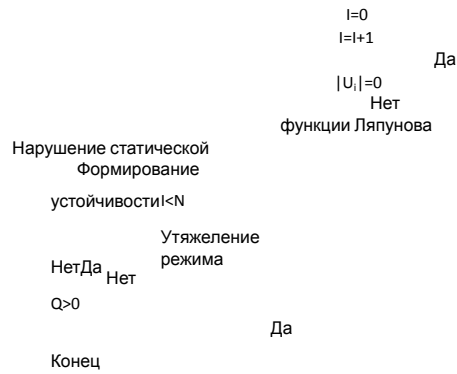


Рис.3. Алгоритм совместного применения уравнений узловых напряжений и функций Ляпунова в квадратичной форме

Генератор, у которого изменение q_{11j} максимально при утяжелении режима по параметру P_j , представляет опасность с точки зрения нарушения статической устойчивости ЭЭС. Тем самым определяется генератор, который быстрее остальных приближается к пределу при данном утяжелении. По существу, исследование устойчивости в «малом» сложной ЭЭС предлагаемым методом превращается в исследование схемы «генератор-шины».

Данный алгоритм аналитически можно показать на примере трехгенераторной системы. На рис.4. приведен характер изменений q_{11j} (где $j=1-3$) – первых элементов миноров матриц квадратичных форм Q_j для каждого генератора исследуемой трехгенераторной электрической системы.

Изменения (приращения) миноров квадратичной формы $(\xi_j, j=1-n)$ для генераторов при утяжелении режима сложной электрической системы различно, что можем написать в виде:

$$\Delta P_{\diamond\diamond\diamond\diamond, \diamond\diamond\diamond\diamond+1} = \Delta_{\diamond\diamond\diamond\diamond} - \Delta_{\diamond\diamond\diamond\diamond+1} \\ \diamond\diamond\diamond\diamond = \diamond\diamond\diamond\diamond P_{\diamond\diamond\diamond\diamond} - P_{\diamond\diamond\diamond\diamond+1}; \quad (19)$$

где $P \rightarrow \diamond\diamond, \diamond\diamond\diamond, \diamond\diamond\diamond\diamond$ и т.д. - параметры режима ЭЭС, по которым могут быть определены изменения миноров генераторов исследуемой системы в результате утяжеления; j -генератор, для которого рассчитывается (19); i -текущий шаг утяжеления для заданного параметра режима ЭЭС.

предлагаемого и известных методов, выраженных необходимым числом операций умножения и деления при анализе статической устойчивости ЭЭС.

45

Сравнительная оценка вычислительной сложности предлагаемого и известных методов, выраженных необходимым числом операций умножения и деления при анализе статической устойчивости ЭЭС

Таблица 1

Численный метод		Количество генераторов				
		1	3	7	15	70
1	D – разбиения	$0,23 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	$0,33 \cdot 10^8$	
2	Расчет собственных значений по QR-алгоритму	$3,85 \cdot 10^3$	$0,27 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^8$
3	Расчет собственных значений по методу Арнольди				$2,1 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^7$
4	Совместное применение узловых уравнений и функций Ляпунова в квадратичной форме	$0,7 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^7$

В пятой главе диссертации «**Технология вложения систем как метод исследования малых колебаний электрической системы**» приведены результаты исследования статической устойчивости сложных ЭЭС новым методом – технологией вложения систем.

Технология вложения систем - универсальная совокупность методов и приемов решения задач теории систем, основанная, прежде всего, на современных достижениях алгебры частных, сводящаяся к определению условий, при которых сложно организованная (многомерная) система ведет себя аналогично относительно более простой, доступной для глубокого исследования системы.

Для применения технологии вложения систем необходимо последовательное выполнение трех этапов: формирование проблемной матрицы, формирование тождеств вложения и непосредственное проведение расчетов.

В операторной форме уравнения (2) и (3) представляются в виде:

$$p \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x}. \quad (24)$$

В общем случае количество уравнений в (24) не совпадает с числом фигурирующих в них переменных. Это связано с тем, что системная матрица

Розенброка:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot 0, (25)$$

соответствующая (24), имеет размер $((n+m) \times (n+s))$, т.е. является прямоугольной, что исключает традиционные процедуры, такие как вычисления определителей, собственных значений и векторов, предназначенных для квадратных матриц. Для преодоления этого препятствия уравнение (24) дополняется уравнением вида:

$u(p) = u(p)$, (26) названного регуляризирующим тождеством, не влияющим на содержание задачи, представленной уравнением (24).

46

В результате получим систему уравнений в блочно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} pI & A & 0 \\ 0 & B & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(p) \\ u(p) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

В этом случае обобщенное уравнение стационарной линейной динамической системы (27) можно написать в виде:

$$\Omega(p)Y(p) = U(p), \quad (28) \text{ где}$$

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} pI & A & 0 \\ 0 & B & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(p) \\ u(p) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

то есть проблемная матрица (проматрица) размера $(n+m+s) \times (n+m+s)$ исследуемой системы является уже квадратной.

Тождество вложения имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (30)$$

где $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ - называется реверсивной проблемной матрицей (репроматрицей) исследуемой системы размера $(n+m+s) \times (n+m+s)$,

$\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ – матрицы вложения и образ системы, соответственно. Соотношение (30) на основе матриц вложения задает линейное преобразование репроматрицы в образ. В работе рассмотрено только вложение в скалярный образ.

Линейная многосвязная система, представленная проматрицей Φ (Φ), вкладывается с помощью матриц вложения $\alpha(p)$ и $\beta(p)$ в скалярный образ $\Phi_{\text{скал}} = \Phi(\alpha) \Phi(\beta)$, если выполняется равенство:

$$\Phi_{\text{скал}} - \Phi = 0$$

$$\Phi_{\text{скал}} 0 - \Phi_{\text{скал}} = 0 \quad (31)$$

или же равенство

$$\Phi_{\text{скал}} + \Phi - \Phi = 0. \quad (32)$$

Выбирая конструкцию матриц вложения $\alpha_{ij}(p)$ и $\beta_{ij}(p)$, можно выделять любой элемент репроматрицы. В случае регулируемой многосвязной динамической системы передаточную функцию - скалярный образ - можно получить в виде:

$$\Phi_{\text{скал}} = \Phi(\alpha) \Phi(\beta) \quad (33)$$

где: $\Phi_{\text{скал}} = \Phi_{\text{скал}} (\Phi_{\text{скал}} - \Phi + \Phi) - \Phi$

$$\Phi_{\text{скал}} (\Phi_{\text{скал}} - \Phi), \quad (34)$$

- знаменатель передаточной функции скалярного образа - характеристический определитель, который определяет полюса исследуемой системы; Φ

$$\Phi = \Phi_{\text{скал}} \Phi_{\text{скал}} - \Phi + \Phi (\Phi_{\text{скал}} + \Phi) \Phi - \Phi_{\text{скал}}$$

$$\Phi_{\text{скал}} (\Phi_{\text{скал}} - \Phi) \quad (35)$$

- числитель передаточной функции скалярного образа, определяющий нули исследуемой системы.

47

На основе преобразования формул (31)-(35) можно найти отдельные передаточные функции системы без вычислений всей ее передаточной матрицы. Для этого необходимо матрицы вложения $\alpha_{ij}(p)$ и $\beta_{ij}(p)$ задать в виде:

$$\alpha_{ij} = 0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0$$

$$\beta_{ij} = 0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0, \quad (36)$$

т.е. ненулевыми элементами являются только единицы на i -м и j -м местах; соответственно, передаточная функция $f_{ij}(p)$ системы может быть вычислена по формуле:

$$\Phi_{\text{скал}} = \det \Phi_{\text{скал}} - \Phi + \Phi \Delta_{\text{скал}} - \det (\Phi_{\text{скал}} - \Phi) \quad (37)$$

где $\Delta_{\text{скал}} = \Phi \Phi$ – неполная матрица размера $(s \times m)$ с единицей на (j,i) -м

месте. На основе приведенных выражений проведены расчетно экспериментальные исследования переходных характеристик ЭЭС различной сложности. Из рис.5. видно, что наличие только канала по производной угла приводит к резкому повышению качества переходных процессов и в несколько раз сокращает время переходного процесса.

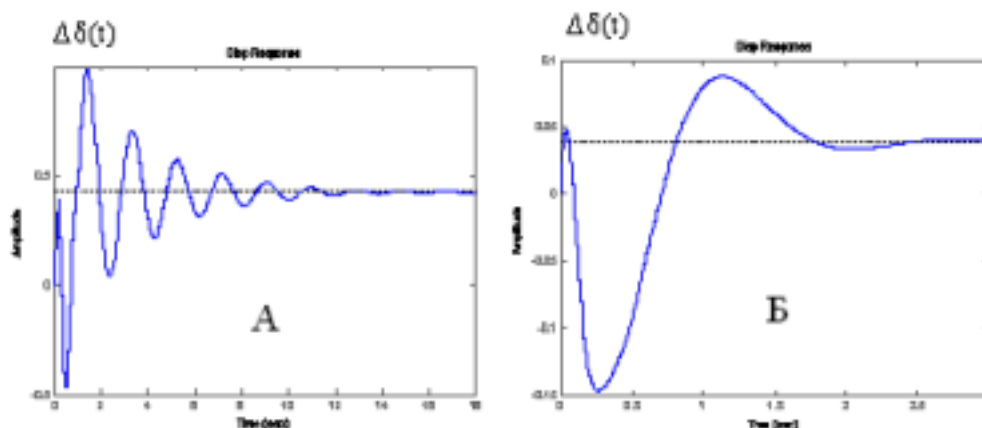


Рис.5. Влияние регулирования возбуждения на переходные характеристики исследуемой системы: А: $k_{0\delta} = 0$; $k_{1\delta} = 0$; $k_{0u} = 10$ ед.; Б: $k_{0\delta} = 0$; $k_{1\delta} = 0.2$ ед., $k_{0u} = 0$

При решении вопросов управления режимами и устойчивости электрической системы возникает необходимость перемещать полюса модели электрической системы с подбором регулятора $\Phi \Phi \Phi \Phi = -\Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi$, с соответствующим законом управления.

Технология вложения систем позволяет переместить требуемый полюс, в том числе и комплексный, при строгой неизменности остальных полюсов, значения которых могут оставаться неизвестными. Данная задача решена В.Н. Буковым, М.Ш. Мисрихановым и В.Н. Рябченко. Основой предлагаемого метода перемещения полюсов является использование специального линейного преобразования матрицы исходной системы (рис.6).

Ввод параметров режима и элементов электрической системы

Формирование уравнений пространства состояний

$$\Phi \Phi = \Phi \Phi \Phi \Phi + \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi = \Phi \Phi \Phi \Phi$$

$\Phi \Phi$

Определение матрицы стратификации: $\Phi \Phi = \Phi \Phi - \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi$

Определение матричных конструкций

$$\Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi, \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi, \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi$$

Проверка условия: $\Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi = 0_{\Phi \Phi \Phi \Phi \Phi \Phi (\Phi \Phi - \Phi \Phi)}, \Theta B \neq 0$

Условие не выполняется

Условие выполняется

Формирование множества регуляторов: $\{K_i\}_{i=1}^m$

Выбор K_i и проверка перемещения полюса

Проверка условия: $\det(sI - A + BK_i) \neq 0$

Условие выполняется Условие не выполняется

Остановка и вывод смещенного полюса и параметров p

е
ж
и
м
а

Рис.6. Схема алгоритма перемещения полюса модели электрической системы

Управление полюсами возможно, если выполняются необходимые и достаточные условия:

$R_{\text{ж}}$

$$g \cdot x(n) \cdot g^T \cdot \Theta \cdot A \cdot \Theta \neq 0$$

$=$ (38)

$R_{\text{ж}}$

$$\text{и } g \cdot x(n) \cdot g^T \cdot \Theta \cdot (A - BK_{\text{ж}}) \cdot \Theta \neq 0$$

$$- BK_{\text{ж}} =, (39)$$

где Θ – матрица стратификации, а $\Theta_{\text{ж}}$ – правый делитель нуля этой матрицы. Матрица стратификации определяется соотношением:

$$\Theta = \overline{A - \lambda I_n}^L. \quad (40)$$

При этом значение любого корня λ матрицы собственной динамики A можно изменить на желаемое $\lambda_{\text{ж}}$ без изменения всех остальных полюсов с

помощью обратной связи по состоянию, образованному регулятором, при надлежащем множеству:

$$\{K_i\}_{i=1}^m = (\{K_i\}_{i=1}^m \sim \{K_i\}_{i=1}^m - \{K_i\}_{i=1}^m_{\text{ж}} + \{K_i\}_{i=1}^m_{\text{ж}} \cdot \{K_i\}_{i=1}^m_{\text{ж}}), (41)$$

если для матрицы стратификации Θ , вычисляемой по формуле (40), обеспечено условие:

$$\Theta B \neq 0, (42)$$

где η - произвольная матрица размера $(s - \text{rank}(\Theta B)) \times 1$ или число. Алгоритм перемещения полюсов модели ЭЭС представлен на рис.6. В работе приведен

$$\begin{aligned}
& \diamond_{31} \diamond_{32} - \diamond_{33} : 000 : 00 - \diamond_3 \quad \quad \quad \begin{matrix} \diamond_0 \\ T_{\diamond_3} : 000 \end{matrix} \\
& \begin{matrix} \diamond_{\diamond_3} \\ \diamond_{\diamond_3} = \end{matrix} \quad \quad \quad (44) \\
& \begin{matrix} \dots\dots\dots : \dots\dots\dots : \dots\dots\dots : \dots\dots\dots \\ 000 : 000 : \overset{1}{\diamond_{\diamond_1}} 00 : - \overset{1}{\diamond_{\diamond_1}} 00 \end{matrix} \quad \begin{matrix} 0 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \diamond 2} \\ \diamond_{\diamond_2} 0 : 0 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \diamond 2} \end{matrix} \\
& 000 : 000 : 0 \overset{1}{\diamond_{\diamond_2}} 0 : 0 - \overset{1}{\diamond_{\diamond_2}} 0 \\
& 000 : 000 : 00 \overset{1}{\diamond_{\diamond_3}} : 00 - \overset{1}{\diamond_{\diamond_3}} \\
& \dots\dots\dots : \dots\dots\dots : \dots\dots\dots : \dots\dots\dots \\
& \begin{matrix} \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \diamond 1} \\ \diamond_{\diamond_1} 00 : \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \diamond 1} \\ \diamond_{\diamond_1} 00 : 000 : - \overset{1}{\diamond_{\diamond_1}} 00 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \diamond_{\diamond_2} 0 : 000 : 0 - \overset{1}{\diamond_{\diamond_2}} 0 \\ \diamond_{\diamond_3} : 000 : 00 - \overset{1}{\diamond_{\diamond_3}} \end{matrix} \\
& 00 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \diamond 3} \quad \quad \quad \diamond_{\diamond_3} : 00 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \diamond 3}
\end{aligned}$$

50

000000

$$\begin{aligned}
& B_3 = \quad \quad \quad 000000 \\
& 000000 \\
& \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 000000 \\
& 000000 \\
& \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 000000 \\
& 000000 \\
& \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad 000000 \\
& 000000 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad . (45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \quad \quad \quad 000000 \\
& \begin{matrix} \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \Gamma 1} . T_{e1} & T_{e1} 0000 \\ \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \Gamma 1} & \end{matrix} \\
& 00 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \Gamma 2} \quad \quad \quad \begin{matrix} \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \Gamma 2} \\ T_{e2} 00 \end{matrix} \\
& \quad \quad \quad T_{e2} \\
& 0000 \overset{\diamond}{\diamond} \underline{0 \Gamma 3} \quad \overset{\diamond}{\diamond} \underline{1 \Gamma 3}
\end{aligned}$$

В работе сформированы уравнения математической модели сложной ЭЭС для использования с технологией вложения систем. При этом полученные выше матрицы собственной динамики и входа имеют вид:

размеры которых равны: матрица A_{Σ} имеет размер $(2n \times 2n)$, а матрица входа B_{Σ} - $(2n \times n)$.

Матрицы (46) позволяют в полном объеме провести исследования динамических свойств исследуемой ЭЭС на основе технологии вложения систем. Матрица коэффициентов регулятора K в данном случае имеет вид: $\Delta \diamond \diamond^1$

где $\Delta_{i,j}$ – коэффициенты усиления АРВ i -го генератора по каналам от

клонения абсолютного угла и скольжения данного генератора. В случае необходимости регулятор может быть настроен для любого режимного параметра или их сочетаний.

Общая проматрица Ω регулируемой электрической системы имеет вид

$$\begin{aligned}
& \diamond\diamond\diamond 0 \cdots 0 : -\diamond\diamond_{11} - \diamond\diamond_{12} \cdots - \diamond\diamond_{1\diamond\diamond} : 0 0 \cdots 0 \\
& 0 \diamond\diamond \cdots 0 : -\diamond\diamond_{21} - \diamond\diamond_{22} \cdots - \diamond\diamond_{2\diamond\diamond} : 0 0 \cdots 0 \\
& \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \vdots \\
& 0 0 \cdots \diamond\diamond : -\diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} - \diamond\diamond_{\diamond\diamond 2} \cdots - \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} : 0 0 \cdots 0 \\
& \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \\
& \diamond\diamond_{11} - \diamond\diamond_{12} \cdots - \diamond\diamond_{1\diamond\diamond} : \diamond\diamond + \diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} 0 \cdots 0 \quad \diamond\diamond_{\underline{0}} \\
& \vdots \diamond\diamond_{\underline{1}} \quad \diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} 0 \cdots 0 \\
& \diamond\diamond\diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} \quad \diamond\diamond\diamond\diamond_2 \cdots 0 \\
& -\diamond\diamond_{21} \diamond\diamond_{22} \cdots - \diamond\diamond_{2\diamond\diamond} : 0 \diamond\diamond + \diamond\diamond\diamond\diamond_{\diamond\diamond 2} \quad \diamond\diamond_{\underline{0}} \\
& \diamond\diamond_{\diamond\diamond 2} \cdots 0 : 0 \diamond\diamond_{\underline{2}} \quad \diamond\diamond_{\underline{0}} \\
\Omega = & \quad \diamond\diamond_{\underline{0}} \\
& \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \vdots \\
& -\diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} - \diamond\diamond_{\diamond\diamond 2} \cdots - \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} : 0 0 \cdots \diamond\diamond + \diamond\diamond\diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} \\
& \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} : 0 0 \cdots \diamond\diamond_{\underline{\diamond\diamond}} \quad \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} \\
& \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \vdots \cdots \cdots \cdots \\
& \Delta_{\diamond\diamond}^1 0 \cdots 0 : \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond 1} \\
& \Delta_{\diamond\diamond}^1 0 \cdots 0 : \diamond\diamond_{11} \diamond\diamond_{12} \cdots \diamond\diamond_{1\diamond\diamond} \quad \Delta_{\diamond\diamond}^2 \cdots 0 : 0 \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond 2} \\
& \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond 1} \quad \Delta_{\diamond\diamond}^2 \cdots 0 : \diamond\diamond_{21} \diamond\diamond_{22} \cdots \diamond\diamond_{2\diamond\diamond} \\
& 0 \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond 2} \quad \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \vdots \\
& \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \backslash \vdots \vdots \vdots \vdots \\
& \Delta_{\diamond\diamond}^{\diamond\diamond} \vdots \diamond\diamond_{\diamond\diamond 1} \diamond\diamond_{\diamond\diamond 2} \cdots \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond} \\
& 0 0 \cdots \diamond\diamond_{\diamond\diamond \diamond\diamond \diamond\diamond}
\end{aligned}
\tag{48}$$

руемой системы в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w, \quad (49)$$

$$y = Cx + D u, \quad (50)$$

$$u = K(y - w), \quad (51)$$

означает, что передаточная матрица от возмущения $w(p)$ к выходу системы $y(p)$ должна быть тождественно равна нулю:

$(A - BK)(C - DK)^{-1} = 0$; (52) где $A - BK = A + B(KC - D)^{-1}K$ – матрица динамики системы с регулятором. Здесь x , u , y , w – векторы состояния, управления, выхода и возмущения системы, соответственно; A , B , C , D – матрицы с постоянными числовыми элементами соответствующих размеров; K – матрица регулятора, с постоянными числовыми элементами.

Основная задача – нахождение регулятора (синтез), обеспечивающего выполнение условия (52). При решении этой задачи возникают определенные трудности, так как в (52) присутствует операция обращения матрицы, причем, как правило, полиномиальной. Современные подходы, основанные на новых конструкциях матриц, позволяют преодолеть эту преграду.

Необходимые и достаточные условия, при которых справедливо тождество (52), обеспечивается, когда система замкнута любым регулятором из множества:

$$K = - (A - BK)(C - DK)^{-1} + \chi + \gamma; \quad (53) \text{ где } \chi \text{ и } \gamma - \text{матрицы заданных размеров с произвольными числовыми элементами,}$$

52

$(C - DK)^{-1}$ – правый делитель нуля матрицы C , $(A - BK)^{-1}$ – левый делитель нуля матрицы $A - BK$, матрицы с верхним обозначением ($\sim$) – сводные канонизаторы соответствующих матриц, двойные и тройные черточки над матрицами обозначают повторное определение соответствующего делителя нуля максимального ранга от комбинации матриц, состоящих под этой чертой.

Расчетный анализ трехгенераторной ЭЭС с АРВ-с, синтезированный и имеющий

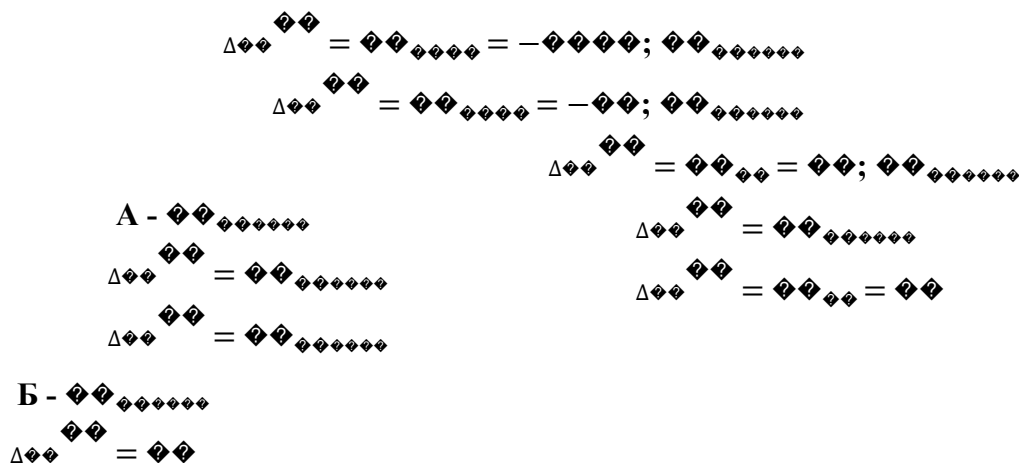
$$\text{вид} \quad \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (54)$$

показывает существенное улучшение динамики системы.

На рис.7. приведены характеристики изменения отклонения угла первого генератора $\Delta\delta_1=f(t)$ электрической системы (рис.7, А) при синтезированных параметрах регулятора (54) и устойчивой, нерегулируемой ЭЭС, при обычном регуляторе (рис.7, Б). Процесс затухает достаточно быстро и носит апериодический характер.



Рис.7. Характеристики изменения угла первого генератора $\Delta\delta_1=f(t)$ трехгенераторной электрической системы при:



Таким образом, можно отметить, что на основе метода канонизации матриц, являющегося основой технологии вложения систем, обоснованы условия инвариантности электрической системы к произвольным внешним возмущениям. Для решения этой задачи синтезирован соответствующий регулятор. Сравнительный анализ полученных результатов с известными положениями теории инвариантности подтверждает их достоверность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и расчетно-экспериментальные исследования статической устойчивости сложных электрических систем на базе разработанных матричных методов и алгоритмов, с применением функций Ляпунова в квадратичной форме и технологии вложения систем, позволяют сделать следующие выводы.

1. Функции Ляпунова в квадратичной форме рекомендованы как эффективный метод для исследования линейных динамических систем, к которым относится электрическая система, описываемая линеаризованными дифференциальными уравнениями.

2. Доказана адекватность условий нарушения статической устойчивости электрической системы, полученных на основе положительности главных миноров матрицы квадратичной формы функции Ляпунова в квадратичной форме, тем же условиям, доставляемым критериями Гурвица.

3. Полученные теоретические и расчетные результаты позволяют исследовать устойчивость ЭЭС в «малом», путем анализа условия положительности первого, главного минора матрицы функции Ляпунова в квадратичной форме $q_{11j} > 0$ и рассматривать ее как практический (упрощенный) критерий статической устойчивости ЭЭС, обеспечивающий и необходимые и достаточные ее условия.

4. Совместное использование функций Ляпунова в квадратичной форме и узловых уравнений позволяет выявить генератор (станцию), работающий в сложной ЭЭС, приближающийся к пределу по статической устойчивости. Математическим условием данного утверждения является $dq_{11j}/dP \rightarrow \max$, т.е., максимальность производной первого главного минора матрицы квадратичной формы по регулируемому параметру для j -го генератора. В этом случае исследование предела статической устойчивости сложной ЭЭС превращается в исследование схемы «генератор шины».

5. На основе технологии вложения систем разработаны проматрицы нерегулируемых и регулируемых сложных ЭЭС, полностью описывающих и определяющих всевозможные характеристики переходных процессов, позволяющих, в том числе исследовать динамические свойства электрических систем при малых колебаниях параметров их режима.

6. Предложена модель, в которой на базе технологии вложения систем синтезирован регулятор сложной электрической системы, аналитически описывающий класс регуляторов, обеспечивающих устойчивость и демпфирование колебаний в исследуемой ЭЭС.

7. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования по анализу статической устойчивости сложных ЭЭС на базе технологии вложения систем показали качественное совпадение полученных результатов с результатами, проверенными на практике эксплуатации электрических систем на основе классических методов, что подтверждает адекватность разработанных моделей существующим.

8. Разработана математическая модель электрической системы, разрешенной относительно отклонений абсолютных углов синхронных генераторов, которая может быть использована самостоятельно для исследований малых колебаний сложных ЭЭС. Данную модель малых колебаний сложных электрических систем рекомендуется использовать совместно с уравнениями узловых напряжений, определяющими модули

напряжений U_i узлов, а также их аргументами, представляющими абсолютные углы δ_i относительно балансирующего узла.

54

**SCIENTIFIC COUNCIL FOR THE AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE
OF DOCTOR OF SCIENCES 14.07.2016.T.02.01 AT TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY AND LIMITED LIABILITY COMPANY
“RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER”
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

MIRZABAEV AKRAM MAKHKAMOVICH

**MATRIX METHODS AND ALGORITHMS FOR STEADY-
STATE STABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS**

**05.05.02 –Electrical engineering. Electric power plants and
systems. Electro-technical complexes and installations
(technical science)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2016

55

Subject doctoral dissertation registered for №30.06.2015/B2015.2.T540 in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of Uzbekistan.

The doctoral thesis carried out at the Tashkent State Technical University.

The full text of doctoral dissertation available on the web page of the Scientific Council for the award of the degree of Doctor of Science 14.07.2016.T.02.01 at the Tashkent State Technical University and «Scientific- technical centre» LLC at www.tdtu.uz.

Abstract of the thesis in three languages (uzbek, russian and english) is available on the web page at www.tdtu.uz and information-educational portal «ZIYONET».

Scientific consultant: Allaev Kakhraman Rakhimovich

Doctor of Technical Science, Professor

Official opponents: Chemborisova Nailya Shavkatovna

Doctor of Technical Science, Professor
(Russian Federation)

Igamberdiev Khusan Zakirovich

Doctor of Technical Science, Professor

Sokolov Valeriy Konstantinovich

Doctor of Technical Science, Professor

Leading organization Coordinating Dispatch Center (CDC)

Defence of the thesis will take place ____ " ____ " 2016, in ____ hours at a meeting of the Scientific Council 14.07.2016.T.02.01 at Tashkent State Technical University and “Research and Development Center” LLC at 100095, Tashkent, Universitetskaya st., 2.

Tel: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

With doctoral dissertation can be found in the Information Resource Center of Tashkent State Technical University (registration number 02).

Address: 100095, Tashkent, ул. Университетская st. Тел.: 246-03-41.

Abstract of the dissertation sent ____ « ____ » 2016 year.

(distribution protocol № ____ of ____ « ____ » 2016 year.)

X.M.Muratov

Chairman of Council for the award of
Scientific degree of Doctor of Science,
Doctor of Technical Sciences, professor

O.O.Zaripov

Scientific secretary of the Scientific Council for the award of
Scientific degree of Doctor of Science,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

T.Sh.Gayibov

Vice-Chairman of the Scientific Seminar
at Scientific Council for the award of
Scientific degree of Doctor of Science,
Doctor of Technical Sciences

56

INTRODUCTION (summary of the doctoral dissertation)

The relevance and demanding of the subject of the thesis. Today, in the world practice, in the sphere of ensuring the stable operation of electric power systems (EPS), pride of place goes to the creation of high-performance control systems of power generation and consumption processes, involving intelligent technologies. One of the most crucial tasks of rapidly developing modern EPS is ensuring its steady-state stability based on real-time operational data processing and analysis. In this area, the leading countries of the world focus on the improvement of control systems to ensure the stability of electric power systems, taking into account fluctuations of mode parameters. «Expenses for the creation of intelligent electric systems, including Smart Grid, are as follows: USA - 7.1 trillion, China - 7.3 trillion, Japan - 0.8 trillion US dollars. The use of the Smart Grid system in 2020 will allow the USA to save about 1.8 trillion US dollars»¹.

Large-scale activities on the effective organization of power generation and improvement of the EPS stability are held in the Republic of Uzbekistan. A number of research works are carried out in this area, including high-performance re-equipment of the steam-gas and gas-turbine technology, providing electricity generation, the development of effective control system of technological objects and improvement of methods and algorithms of research of control systems.

The world's attention is paid to the development of more advanced methods for determining the stability of electric systems, in particular, matrix methods and algorithms that allow to more deeply explore the modal properties of electric power systems, taking into account modern control devices. The implementation of targeted research is a priority in this field, while researches are more relevant in the following areas: the development of matrix methods and algorithms for determining the stability of the electric power system based on automatic generator field regulators; the development of simplified criteria for determining the limit mode for the stability of complex EPS; the development of a model of synthesis of automatic field regulators on the basis of the system inclusion technology. Ongoing researches in the above-mentioned areas show the relevance of the subject of this

thesis.

This thesis research is designed, to a certain extent, to perform the tasks stipulated in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan IIII-2343 dated 5 May 2015 year “On the Program of measures to reduce energy consumption, to implement energy saving technologies in the fields of economy and social sphere for 2015-2019 yy.”, in the Decree of Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No.238 dated 13 August 2015 year “On approval of the regulation relating to the republican commission on energy efficiency and development of the renewable energy resources”, as well as other legal documents adopted in this area.

Compliance of the research with the Republic’s priority fields of science and technology development. This research is executed in accordance with the

¹Intelligent electric power systems: the concept, state and prospects. Automation and IT in Power Engineering, March 2011 No. 3 (20) www.transform.ru: 31.05.2011

57

Republic’s priority field of the science and technology development II. “Power Engineering, Power–Resource Conservation”.

Overview of the international research on the theme of the thesis². Scientific researches aimed at development and implementation of regulated systems to provide stability of complex EPS are carrying out at leading scientific centers and universities, among them: Princeton University, Iowa State University, Rutgers University, Massachusetts Institute of Technology, University of Baltimore (USA), University of Cambridge (England), Royal Institute of Technology (Sweden), Dresden University of Technology (Germany), The China Electric Power Research Institute (China), Siemens (Germany), ABB (Sweden), Moscow Power Engineering Institute, Air Force Engineering Academy (Russia), Tashkent State Technical University, “Research and Development Center” LLC (Uzbekistan). Due to carried out researches on the development of models and algorithms of controlling processes of complex EPS based on the electric system theory and matrices, the several scientific results have been obtained, among them: EUROSTAG – the software designed for analysis optimal operation mode and stability of EPS (Electricite de France, France); SMAS3 – the software designed for analysis transient behavior at small oscillations (Spain); SIMPOW – the software designed for analysis stability and power balance in dynamic systems (Sweden); MASS – the software designed for the mode analysis of complex EPS (Canada); on the basis of IT technologies the SCADA systems were designed (Siemens, Germany, Moscow Power Engineering Institute, Russia, DYNSTACK, Australia). There are several researches on the development of intelligent methods of EPS’s stability control based on the achievements of modern computer technology are carrying out in the world. Among them are the development of methods for solution stability problem of complex linear dynamic systems based on the modern matrix methods and automatic control systems (Lyapunov’s function in quadratic form and system’s embedding approach); the development of advanced algorithms of c EPS’s stability control; the development of transient simulators based on the absolute angles of generators.

The degree of knowledge of the problem. The famous scientists such as:

P.S. Zhdanov, A.A. Gorev, A.S. Lebedev, V.A. Venikov, YU.N. Rudenko, N. I. Sokolov, V.A. Stroeov, I.V. Litkens, V.P. Vasin, S.A. Sovalov, E.D. Kara syov, O.V. Shcherbachyov, YU.P. Goryunov, EH.S. Lukashov, V.V. Bushuev, L.A. Koshcheev, I.A. Gruzdev, A.H. Esipovich, A.A. YUrganov, B.I. Ayuev, P. Anderson, A.A Fouad, P. Kundur, R.T. Byerly, R.J. Bennon, D.E. Sherman, D.Y. Wong, G.J. Rogers, B. Porretta, KH.F. Fazylov, T.KH. Nasyrov, ZH.A. Ab dullaev, V.K. Sokolov, K.R. Allaev etc. carried out theoretical and practical work on the analysis of steady-state stability of EPS, including the work on development of algorithms and software package, which provides stability of EPS in small os cillations.

²Review of foreign scientific researches on the theme of the thesis was based on: <http://www.dissercat.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.topuniversities.com>, <http://www.ifti.ru>. System's embedding. Analytical approach to analysis and synthesis of matrix systems. // Kaluga:, 2006. –720 pages. and other sources.

58

Foundations of modern matrix theory and its application in various fields of science and technology have been developed in the works of famous authors, such as Felix Gentmacher, Rudolf E. Kalman, A.A. Krasovskij, A.A. Voronov, X. Rosenbrock, YU.N. Andreev, M. Uonem, P.L. Falb, Kh.D. Ikramov, V.N.Bukov, V.N. Ryabchenko, M.SH. Misrihanov, E.M. Smagina, N.R. YUsupbekov, KH.Z. EHgamberdiev and others. The essential results were obtained, created by them algorithms and software up to now have been used in the design and control of complex dynamic systems.

The researches related to the solution of issues of providing stability and control of complex EPS were carried out by the number of scientists, among them: V.N.Bukov, V.A. Andreyuk, N.I. Voropai, M.SH. Misrihanov etc. The analysis shows that at this moment the matrix methods and algorithms are used to analyze the stability of EPS and some positivity have been obtained. However, in scientific publication are not adequately considered issues of development of high effective control algorithms of EPS and systematization of modern approaches, as well as, issues of creation and further development of effective methods, models and algorithms of controlling processes with consideration of controllers.

Communication of the thesis theme with the research works of higher educational institution where the thesis is made. The thesis research is carried out within the framework of scientific field of the Tashkent State Technical University on the theme No.2016001 – “Development and analysis of modern methods of automatic control of normal, transitional and optimal operation conditions of EPS” (2015-2017); A-3-96 – “Optimal load control in the power system of the Republic of Uzbekistan” (2015-2017); F-2-33 – “Estimation of energy efficiency and the laws of mathematical simulation of pumping stations”(2012-2016).

The objective of the research is to develop matrix methods and algorithms of analysis of steady-state stability of complex EPS, to develop simplified methods of estimation of steady-state stability limit and synthesis of controller models based on the systems' embedding approach.

Tasks of the study.

comparative analysis of existing methods and algorithms of studying

steady-state stability of controlled electric power systems;

development of simplified methods and algorithms of studying small oscillations of complex electric power systems on the basis of the modern matrix theory;

development of methods of studying small oscillations of controlled electric power systems on the basis of the system's embedding method; synthesis of regulators of the electric power system, allowing one to ensure stability and damping of oscillations at small disturbances of the complex EPS' operation condition;

computational-experimental studies and comparative analysis of steady state stability of regulated complex electric power systems on the basis of developed matrix methods and algorithms.

The object of the study is electric power systems (EPS) in the context of impact of small oscillations to the mode parameters.

59

The subject of the study is matrix methods, algorithms and mathematic models of analysis of small oscillations of regulated electric power systems (EPS), synthesis methods of automatic excitation control model based on system's embedding approach.

The study methods. In the course of research the Theory of Electric Power Systems, methods of the modern Theory of Matrices and Automatic Control Systems and synthesis of the system's embedding method, methods of small oscillations of dynamic systems and linear algebraic methods are used.

Scientific innovativeness of the dissertation study consists in the following:

on the basis of Lyapunov's function in the quadratic form, the simplified criterion of steady-state stability of the electric power system was obtained, which consisted in positivity of the first major minor of the quadratic-form matrix ($\Delta_{11} > 0$),

ensuring necessary and sufficient conditions of the EPS stability;

the combined use of the method of Lyapunov's function in the quadratic form and node voltage equations was developed, which allowed for reducing studies of steady-state stability of a complex electric power system to the circuitry of a simple electric power system, or the "generator-bus" system;

a promatrix of the complex unregulated and regulated electric power system was developed on the basis of the system's embedding method, which allowed for the study of dynamic properties of EPS;

the algorithm of pole transfer from the spectrum of the matrix of own dynamics of the electric power system was developed, which ensured stability and damping of fluctuations of the operation condition parameters at small oscillations in electric power systems;

mathematical model of the class of regulators of the complex electric system was constructed on the basis of the system's embedding method, which ensured stability and damping of fluctuations of the operation condition parameters at small oscillations in EPS.

Practical results of the dissertation study consists in the following:

adequacy of steady-state stability conditions of the electric power system at small perturbations of the operation condition parameters, obtained on the basis of Lyapunov's functions in the quadratic form, with conditions provided by Hurwitz criteria was proven;

the simplified criterion of steady-state stability analysis on the basis of principal, first minor of matrix in Lyapunov's quadratic form was developed, which allows significantly speed up the process of stability estimation of complex EPS and adoption of operational decisions of dispatching tasks;

the mathematic model of transitional processes at small oscillations in the regulated complex electric power system was developed, whose variables were absolute angles of generators load;

the mathematic model and promatrix of complex EPS on the basis of system's embedding approach was developed, which allows to investigate the dynamic characteristics of EPS in the simulation and control;

60

the algorithm and software package was developed. It allows to displace pole and to synthesize a class of regulator, which provides stability and damping of EPS in small oscillations.

Reliability of the results obtained stems from the use of well-known, practically verified methods of the theory of electric power systems and methods of modeling their elements and the theory of matrices and automatic control systems. Calculation-experimental studies of small oscillations of complex EPS carried out on the basis of the developed matrix methods have shown the match of the obtained results with the results of studies conducted by Classical Methods.

Scientific and practical significance of study results. The scientific importance of study results is consists of development the mathematic model of studies of small oscillations of the regulated EPS, which permits simplified determination of conditions of steady-state stability loss on the basis of a Lyapunov's matrix equation and provides both its necessary and sufficient conditions, as well as in the building of the complex EPS model relative to absolute load angles of the system generators. The class of regulators of the complex EPS was constructed by analytical methods based on of system's embedding approach.

The practical importance of developed simplified methods of analysis of small oscillations in complex EPS consist in application these methods in the design of electric power systems and EPS dispatch control systems.

Implementation of findings. The results of the research for development matrix approach and algorithms of EPS's steady-state stability analysis: the developed matrix approach and algorithms for studying the steady-state stability on the base of Lyapunov's functions have been implemented at the Unitary Enterprise "KuchGES" JSC "Uzbekenergo" (Certificate of implementation No. DU-OP-21/2628 from JSC "Uzbekenergo" dated 11th July of 2016). The results of the research allow increasing the steady-state stability limit to 1% and so increasing the production efficiency;

the developed algorithm of controller synthesis and pole variation based on

the system's embedding approach have been implemented at the JSC "Chirchiq transformator zavodi" by the JSC "Uzeltexsanoat" (Certificate No. 04-149 from JSC "Uzeltexsanoat" dated 14th October of 2016). Through the implementation of given algorithm for each power transformer TDTN-25000/110/35 designed by taking into account a damping of small oscillations about 5% of winding materials will be saved;

the mathematic model and promatrix of complex EPS based on the absolute angles of generator were implemented in fundamental project OT-F5-036 "The formalization of interconnection between the electromechanical and hydromechanical transient in EPS" (2007-2011) for the formalization of electromechanical transient processes (Certificate No. FTK-0313/722 dated 26th October of 2016). The implementation of scientific results exposes formalization of electromechanical and hydromechanical transient processes and increases the effectiveness of technical-scientific researches.

Evaluation of work results. The results of the work were announced on the 12 applied science conferences, including 5 international conferences such as: In-

61

ternational scientific and technical conferences "Electrical Power Engineering-2010" and "Electrical Power Engineering-2012" Varna, Bulgaria, (2010 and 2012); Asia-Pacific Power and Energy Engineering conference "APPEEC-2013" and "APPEEC-2015" Beijing, China, (2013 and 2015); 10-th International Conference on Science, Technology and Management Kuala Lumpur, Malaysia, (2015); on the proceedings of the scientific workshop at the Dispatch control of Energy Power System of Uzbekistan, (2016); on the joint seminar of departments of Tashkent State Technical University – "Electric Power Plants and Systems", "Hydraulics and hydropower engineering", "Energy supply" and „Electrical engineering, mechanical engineering and electrical technologies", (2016).

Publications on the theme. 25 research papers, out of which, 8 in foreign journals were printed. Among them 15 papers were printed in journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication the main scientific results of the doctoral dissertation, including 2 monographs, 2 in foreign journals and 13 in national journals. Four certificates about the registration of software were obtained.

Structure and size of the dissertation. The dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion, references and annexes. The volume of dissertation is 188 pages.

THE MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the introduction, relevance and demand for the theme of the dissertation are justified; its objectives and goals are formulated; objects and subjects of the study are defined; compliance of the study with priority areas of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan is established. Scientific innovation is shown, reliability of results obtained is justified; theoretical and practical significance of the results are disclosed; documents on putting the study results into life, data on the work approbation, and data on published articles and the

structure of dissertation are listed.

In the first chapter of the dissertation titled «**The modern state of the problem of study of small oscillations of EPS**», the critical analysis of publications on the modern state of the problem of study of small oscillations (steady-state stability) of complex EPS by means of matrix methods is listed.

Using Lyapunov's and Riccati matrix equations is widening in connection with developing efficient algorithms and software for numerical and analytical methods of their solution.

It is well-known that the Lyapunov's function in the quadratic form for linear differential equations with constant factors is the sole function which ensures both necessary and sufficient conditions of stability of the system under survey, at its small disturbances.

One should highlight intense studies which have led to new and extremely efficient methods of solving matrix equations, including analytical ones which gain broad usage in practice. In the last 20-25 years, Russian scientist V.N. Bukov and his scientific school offered new matrix designs allowing for expansion of the cir-

62

cle of problems being solved, which include not only minimum-phase systems but also non-minimum-phase ones. Matrix designs of the type of zero divisors and canonicalizers open new possibilities of analysis and synthesis of linear dynamic systems which possess numerical and algorithmic advantages over conventional studies.

The kernel of the method of study of dynamic systems – the system's embedding method – is formal and strict definition of such conditions, under which a behavior of complexly organized matrix system is described or construed as the behavior of an aggregate of simpler systems.

The system's embedding method has started to be used relatively recently in the studies of electric power systems

The area under consideration is reduced to two items. First, this is representation of the problem of the theory of systems under survey in the form of some specially constructed matrix which is called the problem matrix (or, in the abbreviated form, the promatrix) and contains all-exhausting information about properties of the linear dynamic system. Second, it is determinant ratios, the fulfillment of which is the necessary and sufficient condition of equality of transfer functions (operators) of the system under survey and the system with desirable properties which is called the image.

Methods have been developed and the algorithm is being built for solution equations of the electric power system under conditions of local changes of matrices of coefficients.

Conducted comparative assessment of investigation methods of small oscillations of linear (linearized) dynamic systems, which include issues of steady-state stability of multimachine electric power systems, shows the increasing role of matrix methods in view of their computational efficiency and orientation towards the use for description of transitional modes of complex dynamic systems. At that, Lyapunov's theorems provide theoretical grounds of the study of steady-state sta

bility of the EPS mathematical model.

In the second chapter of the dissertation titled «**The selected statements of modern Theory of Matrices and Automatic Control Systems**», the selected statements of contemporary Theory of Matrices and Automatic Control Systems are listed.

It is shown that methods applied to solution of matrix equations are reduced to the execution of a sequence of elementary transformations of lines or columns of the matrix of the problem being solved, with the account of the right term. Such transformations are equivalent to multiplication of the initial matrix by matrices of the special form. They include algebraic objects and matrices like zero divisors of matrices (right and left), canonizers (right, left and summed-up), noncommutativity of a matrix representation of the systems under survey, which predetermine algebraic peculiarities of their models allowing one to draw profound analysis of intrinsic properties of the mathematical object.

Prominent Russian scientist V.N. Bukov and his colleagues disclosed the content of matrix zero divisors and developed the method of solving matrix equa-

63

tions on the basis of the method of canonization, which allows providing analytical studies of matrix equations.

Let A be the matrix of the dimension $(m \times n)$ with $\text{rank } A = r$. For this matrix, the following terms are introduced: the left zero divisor – matrix L of the dimension $(m-r)$; right zero divisor – matrix R of the dimension $(n-r)$ and rank $(n-r)$; left canonizer – matrix U of the dimension $(r \times m)$; right canonizer – matrix V of the dimension $(n \times r)$ and summed-up canonizer – matrix W of the dimension $(n \times m)$.

Zero divisors of matrices L и R formalize all linear-dependence combinations of lines and columns of an arbitrary matrix A . The matrices U and V are peculiar as they characterize all linear-independent combinations, respectively, of lines and columns of the matrix A .

The following equalities are just:

$$L \cdot A = 0, \quad A \cdot R = 0, \quad U \cdot A = 0, \quad A \cdot V = 0, \quad U \cdot A \cdot V = 0,$$

= 0,

W

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= 0,$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Thus, any matrix A corresponds to a non-single thrice of matrices including left $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ and right $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ zero divisors of the maximum rank, as well as summed-up ca nonizer $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, that is:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, (1)$$

which characterize the internal structure of the matrix A.

Matrix representation in the form of (1) is called “canonization of the matrix”.

Study of problems of analysis and synthesis of a dynamic system at small disturbances is related to the determination of its states forming a space of states, $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ and being defined by solution of equations, involving matrices with constant coefficients:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} (2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} (3)$$

where A, B, C, and D are matrices, defined by parameters of the system under survey, parameters of the regulator and external influences (input parameters), output parameters and connection between input and output. Equations (2) and (3) are

called the equations of the system “input-state-output”.

Equations for variables of the system state can be analyzed via the Lyapunov's function in the quadratic form, ensuring both necessary and sufficient conditions of the stability of the autonomous linear system under study. Listed in the work are matrix methods of solving equations of the space of states and Lyapunov's matrix equation.

In the third chapter of the dissertation titled «The development of simplified criteria of steady-state stability of EPS on the basis of Lyapunov's function in quadratic form», the simplified criterion of steady-state stability of EPS, providing for both necessary and sufficient conditions of such stability, is developed on the basis of Lyapunov's functions in the quadratic form. Matters of small oscillations of electric power systems, known types of loss of steady-state stability obtained on the basis of Hurwitz criteria are considered by means of analysis of the characteristic equation of the system being studied:

64

$$a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + a_n s^n = 0.$$

Steady-state stability loss types have been defined proceeding from the requirements of necessary and sufficient conditions of stability, expressed in the positivity of coefficients of the system characteristic equation ($a_i > 0$ are necessary conditions) and all Hurwitz determinants ($\Delta_i > 0$ are sufficient conditions). Clearly, with increasing degree of the characteristic equation n , the solution of the set problems becomes significantly more difficult.

This problem can be solved by more “compact” means, with significant computational advantages, with the use of Lyapunov's functions in the quadratic form.

The mathematical model of autonomous stationary system, to which first approximation differential equations of the electric power system can be reduced given by:

$$\dot{x} = Ax$$

$$A = A(x) \quad (4)$$

where A —matrix of the order $(n \times n)$ with constant elements, called the matrix of state or the matrix of own dynamics of the electric power system being studied; x , Δx — the column-vector of parameters of the EPS operation condition and their small deviations.

Let set the quadratic form:

$$Q(x) = x^T Q x \rightarrow Q = Q^T, \quad Q = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

here Q is still unknown quadratic matrix of coefficients in the quadratic form; and x^T is the transposed x (line-vector).

Functions (5) are called Lyapunov's functions in the quadratic form. Let find the derivative of this function, considering equations (4):

$$\dot{Q}(x) = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (x^T Q x) = \dot{x}^T Q x + x^T Q \dot{x} = x^T (A^T Q + Q A) x$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 & \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \\
 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6) \text{ Let introduce the} \\
 & \text{designation}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

where C – identity matrix.

Equation (7) is called Lyapunov's matrix equation. If the matrix Q is positive definite, then

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} < 0, \quad (8)$$

when $\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} > 0$, i.e. the descent of function $\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}$ occurs; hence, the trajectory of the system comes to the origin and the solution of the autonomous linear system (4) is stable asymptotically.

Thus, if odds are fulfilled simultaneously

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} > 0 \text{ and } \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} < 0, \quad (9)$$

in some area of the space of variables $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, containing the origin, the position of equilibrium in the origin is asymptotically stable. This statement is formulated in Lyapunov's theorem.

It should be noted that this is the sole case when a Lyapunov's function in the quadratic form ensures both necessary and sufficient conditions of the asymp-

65

totic stability of the linear dynamic system being studied and is universal for this reason; that is, it is the same for any dynamic systems, if the system is described by linear differential equations with constant coefficients. In all other cases, Lyapunov's functions being formed ensure only sufficient conditions of stability and, thereat, they are constructed by the trial-and-error method, i.e. are not universal. For this reason, the use of Lyapunov's function for linear systems is limited.

The major problem deals with the solution of Lyapunov's matrix equation (7) and determination of Q as positively definite matrix.

Elements of the matrix Q are determined from (7) by solving $\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} + 1 \cdot 2$ equations, where n is the number of equations. At that, the conditions of the dynamic system stability, obtained on the basis of the solution of (7), must be strictly equivalent to solutions obtained on the basis of Hurwitz criteria.

In accordance with Sylvester's theorem, positivity of major diagonal minors of this matrix provides the necessary and sufficient conditions of the positive definiteness of Q and, consequently, stability of the surveyed system (4) at small disturbances, i.e:

$$\Delta_{11} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}_{11} > 0, \Delta_{12} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}_{11} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}_{12}$$

electric power system (nonperiodic deviation, self-excitation and self-oscillation) stem from the conditions of the breach of positivity of the first major minor of the matrix of quadratic form Q .

Hence, the conditions of steady-state stability loss of EPS, obtained by Lyapunov's second method, match those earlier found on the basis of generalized conditions of Hurwitz.

The strong side of the proposed method of study of the EPS steady-state stability consists in the fact that all types of stability loss "in the small" are contained in the first major minor and stem from the condition $\Delta_{11} > 0$, this statement is just for the complex EPS as well.

This fact was confirmed by results of computational-experimental studies of EPS of various degree of complexity. By way of illustration, comparative curves of changing coefficients of the characteristic equation and minors of the matrix of the quadratic form, estimated for the simple and three-generator electric power system, are depicted in Fig. 1. Changes of coefficients of the characteristic equation differ in the nature with the EPS operation condition getting more complex. At the same time, the change of major minors of the matrix of the quadratic form intrinsically has the same character. It is clearly obvious from curves that this property does not depend on the complexity of the studied system.

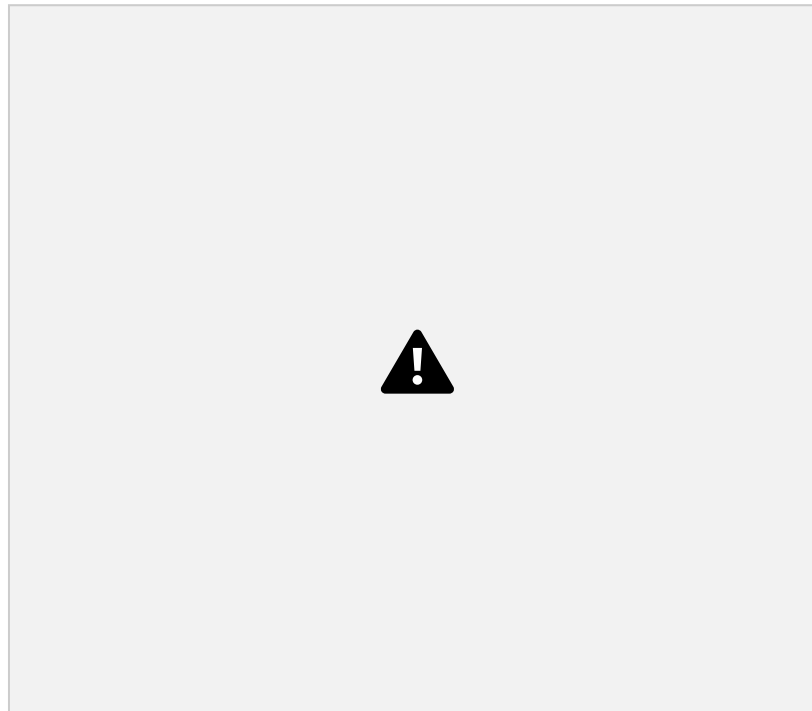


Fig.1. Changes of coefficients of the characteristic equation and Hurwitz determinants (A) and major minors of the quadratic form of the Lyapunov's equation (B) for a simple and three-generator systems

On this basis, it is possible to recommend the simplified method of steady state stability analysis of EPS by studying positivity of only $\Delta_{11} > 0$ and considering it as the feasible criterion of steady-state stability, ensuring both its necessary and sufficient conditions.

At the study of complex EPS, it provides the significant computational effect

because it allows one to avoid the multiple computation of high-order determinants or coefficients of the characteristic equation.

The problem of synthesis was solved on the basis of equations of state variables with the solution of the Lyapunov's matrix equation and Riccati matrix equation:

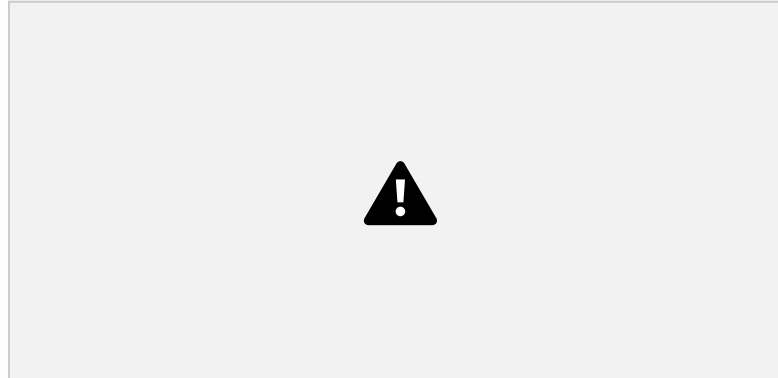


Fig.2. Transitional characteristics in the simple EPS: (A) the regulator is off; (B) there is AEC, responding to a deviation of voltage, rotor angle and first derivative of the angle with synthesized amplification gains:

$$K_{01} = 11,57; K_{02} = 16,22 \text{ and } K_{03} = -0.3854.$$

In Fig.2 the transitional characteristics of EPS at the AEC's synthesized parameters on the basis of solution the following matrix equation, are presented:

$$A + B = C \approx 12I - 6h + C^2 h^{-1} 12I + 6h + C^2 h^2 = D, \quad (17) \text{ where}$$

$$C = 12I - 6h + C^2 h^{-1} 12I + 6h + C^2 h^2,$$

I and h is the identity matrix and the calculation pace, respectively. **In the fourth chapter** of the dissertation titled «**The development of technique of definition of steady-state stability limit of the complex EPS on the basis of Lyapunov's function in quadratic form**», the technique of definition of the steady-state stability limit of the complex EPS is developed on the basis of combined use of the Lyapunov's function in the quadratic form and nodal voltage equations.

Steady-state stability of the complex EPS is studied therefore on the basis of the combined solution of the Lyapunov's matrix equation (7) and nodal voltage equations:

$$V = V_0 + K_{01} \Delta V_0 + K_{02}^* \Delta \delta. \quad (18)$$

When studying steady-state stability of complex EPS, first the calculation of the established operation condition on the basis of nodal voltage equations is conducted, the voltage V_k for each node k and its argument δ_k are defined and then,

(Fig.3) is tested.

using these data, positivity of the first major minor Q_{11} of the quadratic

matrix Q Beginning
Calculation of the normal
operation condition

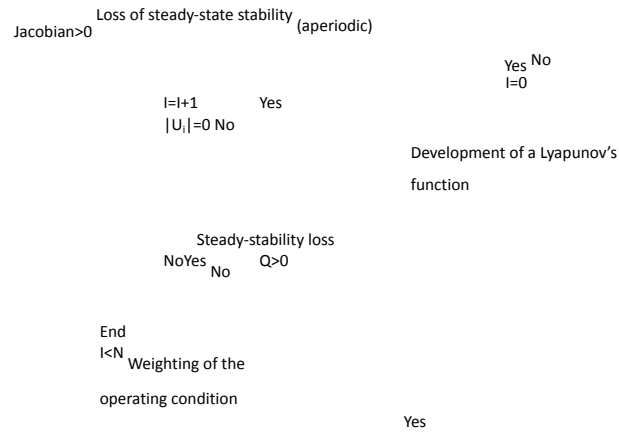


Fig.3. The algorithm of combined use of nodal voltage equations and Lyapunov's functions in the quadratic form

The generator, whose change of $\Delta \Pi_{11}$ is maximal at the weighting of the operation condition parameter Π_{11} , poses danger from the point of loss of steady state stability of EPS. Thus, the generator is defined which comes to the limit at that weighting most quickly. In essence, the study of stability of the complex EPS "in the small" by means of the proposed method turns into the study of the "generator-bus" circuitry.

This algorithm can be shown analytically at the example of the three generator system. Fig. 4 shows the character of changes of $\Delta \Pi_{11}$ (where $j=1-3$), that is: first elements of minors of quadratic matrices $\Delta \Pi_{11}$ for each generator of the three generator electric power system.

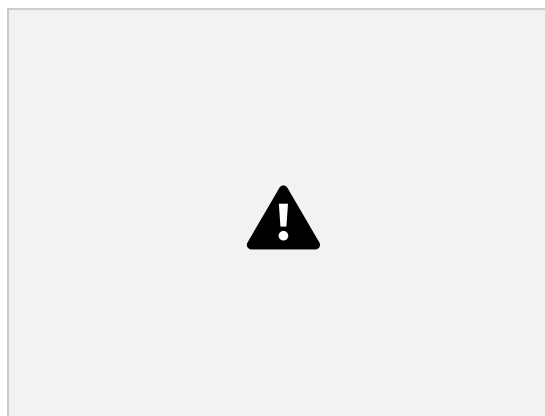


Fig. 4. Changes of first major minors of the three-generator system

Changes (increments) of minors of the quadratic form ($\Delta \Pi_{j, \dots, j} = 1 - \Pi_{j, \dots, j}$ for different generators with the weighting of the operation condition of the electric power system are different, which we can put down as:

$$\Delta \Pi_{j, \dots, j, j+1} = \Delta \Pi_{j, \dots, j} - \Delta \Pi_{j+1, \dots, j+1} \quad \Pi_{j, \dots, j} - \Pi_{j+1, \dots, j+1}. \quad (19)$$

where $\Pi \rightarrow \Pi_j, \Pi_{j,j}, \Pi_{j,j,j}$, etc. are parameters of EPS operation condition, using which the changes of minors of generators of the system under study can be defined after the weighting; j is generator, for which (19) is calculated; i is current pace of weighting for the set parameter of the EPS operation condition.

Condition $\Delta \Pi_{j, \dots, j} > 0$ is fulfilled always for the quadratic form; hence, one may restrict oneself by the study of the strict fulfillment of the inequality $\Delta \Pi_{j, \dots, j} - \Delta \Pi_{j+1, \dots, j+1}$

$$\Pi_{j, \dots, j} - \Pi_{j+1, \dots, j+1} = \Pi_{j, \dots, j} - \Pi_{j+1, \dots, j+1} > 0. \quad (20)$$

In this way, to ensure the steady-state stability of the j -th generator and, consequently, EPS, the following condition should be fulfilled:

$$\Pi_{j, \dots, j} - \Pi_{j+1, \dots, j+1} > 0. \quad (21)$$

Based on the results obtained, one can offer the following algorithm of steady-state stability studies of complex systems.

In complex EPS, with weighting by a set parameter of the mode Π , at each step i , the condition (21) is checked and compared for each generator or selected generator groups:

$$\begin{aligned} \Pi_{j, \dots, j} &> \dots \Pi_{j+1, \dots, j+1} \\ \Pi_{j, \dots, j} &> \dots \Pi_{j+1, \dots, j+1} \end{aligned} \quad \Pi_{j, \dots, j}, \quad (22)$$

where n is number of generators or stations tested for steady-state stability. The generator, for which the change of the first major minor of the coefficient matrix of the quadratic form will be maximum at the change of the selected parameter of the system's operation condition will pose the greatest danger from the point of loss of steady-state stability:

$$\Pi_{j, \dots, j} - \Pi_{j+1, \dots, j+1} > 0, \quad (23)$$

for the series of generators under survey.

Table 1 – Comparative estimate of computational complexity of the proposed and conventional methods, expressed by the necessary number of multiplications and divisions at the analysis of steady-state stability of EPS

Numerical method	Number of generators
------------------	----------------------

		1	3	7	15	70
1	D-division	$0,23 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	$0,33 \cdot 10^8$	
2	Computing of own values using QR algorithm	$3,85 \cdot 10^3$	$0,27 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^8$
3	Computing of own values using Arnoldi's method				$2,1 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^7$
4	Combined used of NVE and Lyapunov's functions in the quadratic form	$0,7 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^7$

It allows one to arrange control over the transitional process of this generator by means of regulation of AEC, auto power control (APC) and other regulating devices and preliminarily ensure its steady-state stability. The significance of this result for the practice of power systems' running is evident.

Table 1 shows the comparative estimate of computational complexity of the proposed and conventional methods, expressed by the necessary number of acts of multiplication and division at analysis of steady-state stability of EPS.

In the fifth chapter of the dissertation titled «**System's embedding approach as the method of study of small oscillations in the EPS**», the results of the study of complex EPS' steady-state stability by a new method, called the system's embedding method, are presented.

The system's embedding method is the universal aggregate of methods and techniques of solving problems of the systems theory, based first on modern advances of algebra of quotients, which can be reduced to the determination of conditions, under which a complexly organized (multidimensional) system behaves similarly to a simpler system, available for profound investigation.

To apply the system's embedding method, it is necessary that three stages should be fulfilled sequentially: forming the problem matrix, forming equalities of embedding and making computations.

In the operator form, equations (2) and (3) are represented as

follows: $\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{B} \mathbf{X} + \mathbf{C}$,

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{B} \mathbf{X} + \mathbf{C} \quad (24)$$

In the general case, the number of equations in (24) does not match the number of its variables. It is related to the fact that the system matrix of Rosenbrock:

$$\mathbf{R}(\lambda) = \mathbf{A} - \lambda \mathbf{B} - \mathbf{C} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B}^T$$

$$\mathbf{R}(\lambda) \mathbf{0} \quad (25)$$

matching (24), has the size $(n + m + m + m)$, i.e. is rectangular that excludes traditional procedures such as computations of determinants, own values and vectors predestined for quadratic matrices. To overcome this hindrance, equation (24) is supplemented by an equation of the following form:

[illegible]
$$\begin{aligned} \diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit &= \diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit_{\diamondsuit\diamondsuit} - \diamondsuit\diamondsuit + \diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit - \diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit \\ &\quad \diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit\diamondsuit_{\diamondsuit\diamondsuit} - \diamondsuit\diamondsuit, \end{aligned} \quad (34)$$

72

form: $\diamond\diamond = 0 \dots 0 1 0 \dots 0^{\diamond\diamond}$

Influence of excitation regulation on transitional characteristics of the system being studied: A: $\varphi_{0\varphi\varphi} = 0$; $\varphi_{1\varphi\varphi} = 0$; $\varphi_{0\varphi\varphi} = 10$ $\varphi_{1\varphi\varphi} = 0$; $\varphi_{0\varphi\varphi} = 0$; $\varphi_{1\varphi\varphi} = 0,2$; $\varphi_{0\varphi\varphi} = 10$

Based on the above-listed expressions, computational-experimental studies of characteristics of EPS of different degree of complexity were carried out. From Fig. 5 is seen that the availability of only one channel by the angle derivative leads to the jump of quality of transitional processes and cuts the time of the transitional process by few times.

When solving problems of operation condition control and stability of the electric power system, the necessity arises to move poles of the electric system model, involving selection of the regulator $\Phi(s) = -\frac{1}{G(s)}$, with the relevant control regularity.

The system's embedding method allows shifting the required pole, including the complex one, at strict exchangeability of the rest poles, whose magnitudes may remain unknown. This problem was solved by V.N. Bukov, M.Sh. Misrikhanov and V.N. Ryabchenko. The basis of the proposed method of shifting poles is the use of the special linear transformation of the initial system's matrix.

73

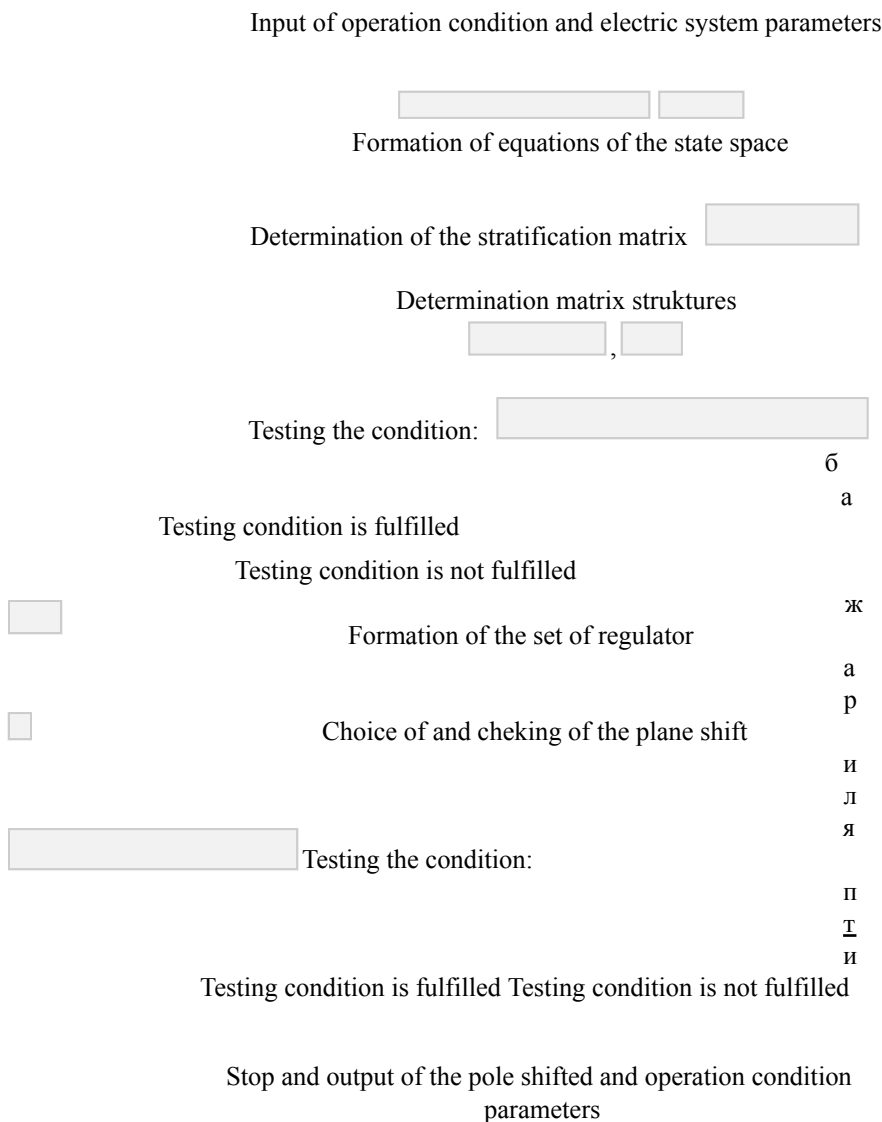


Fig.6. The chart of the pole-shifting algorithm of the electric power system model

0 0 0 0 0 0

[illegible]

[illegible]

The obtained equations and their matrices are adapted for joint use with the Lyapunov's matrix equation and nodal voltage equations, ensuring the compact formation of the model of multimachine EPS, with the account of regulating devices. Since the matrices are sparse, their computational efficiency is undoubted that is confirmed by the conducted computational-experimental studies of EPS of different degree of complexity.

In the study, equations of the mathematical model of the complex EPS are formed, to be used along with the system's embedding method. Thereat, the above mentioned matrices of own dynamics and input have the form:

[illegible]

$$\begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \dots & \Delta_{nn} \end{pmatrix} \quad (46)$$

and are of the following size: matrix Δ_{ii} has the size $2n_i \times 2n_i$, and input matrix Δ_{ij} , $(2n_i \times 2n_j)$.

Matrices (46) allow for a full-fledged study of dynamic properties of the EPS under study on the basis of the system's embedding method. The matrix of regulator coefficients K in this case is written as:

$$K = \begin{pmatrix} \Delta_{11}^1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta_{11}^1 & 0 & \dots & 0 & \Delta_{12}^1 & \dots & \Delta_{1n}^1 \\ \Delta_{21}^1 & \Delta_{22}^1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta_{21}^2 & \Delta_{22}^2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{n1}^2 & \dots & 0 & 0 & \Delta_{n2}^2 & \dots & \Delta_{nn}^2 \end{pmatrix}, \quad (47)$$

where Δ_{ii}^1 and Δ_{ij}^1 are amplification coefficients of channels of absolute angle deviations and the slipping of the given generator.

When necessary, controller could be adjusted for any operating condition or their combination.

The general promatrix Ω of the regulated electric power system looks like:

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Delta_{11}^1 & \Delta_{12}^1 & \dots & \Delta_{1n}^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta_{22}^1 & \dots & \Delta_{2n}^1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Delta_{n1}^2 & \Delta_{n2}^2 & \dots & \Delta_{nn}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix}$$

Necessary and sufficient conditions, under which the equality (52) is just, are ensured when the system is closed by any regulator from the set: $\begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} \sim + \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} (53)$

where χ and γ are matrices of the set size with arbitrary digital elements, $\begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix}$ is right zero divisor of the matrix C , $\begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix}$ is left zero divisor of the matrix $\begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix}$, matrices with the upper mark ($\sim$) are summed-up canonizers of the respective matrices; double and triple bars above matrices designate the repeated definition of the re-

77

spective zero divisor of the maximum rank out of the combination of matrices standing under that bar.

Computational analysis of the three-generator EPS with AECs, synthesized and having the form:

$$\begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & 0 & \bar{C}_{21} & 0 & \bar{C}_{51} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

shows the significant improvement of the system's dynamics.

In Fig.7, listed are characteristics of the change of deviation of the first generator's angle $\Delta\delta_1=f(t)$, the stable, regulated electric power system (Fig.7, A) at the synthesized parameters of the regulator (54) and the stable, unregulated EPS (Fig. 7, B). The process attenuates relatively quickly and bears virtually aperiodic character. So one may note that conditions of invariance of the electric power system's reaching arbitrary external perturbations are justified on the basis of the method of matrix canonization, which is the basis of the system's embedding method. For solving this problem, the relevant regulator was synthesized. Comparative analysis of the results gotten and the conventional provisions of the theory of invariance confirm reliability of the former.

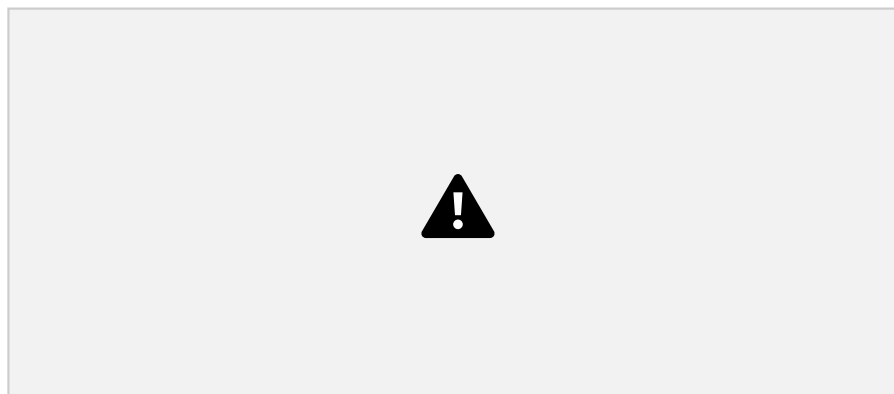


Fig.7. Change characteristics of the angle of the first generator $\Delta\delta_1=f(t)$ of the three-generator electric system at:

$$\Delta\delta_1^1 = \bar{C}_{11} = -10; \quad \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \\ \bar{A} & \bar{B} \end{bmatrix}$$

7. The conducted computational-experimental studies aimed at analysis of steady-state stability of complex EPS on the basis of the systems embedding method have shown the qualitative match of the obtained results with the results, checked in the course of practical running of electric power systems on the basis of Classical Methods that confirms the adequacy of the models developed to the already existing ones.

8. The mathematical model of the electric power system, resolved relative to deviations of absolute angles of synchronous generators, is developed, which can be used autonomously for the study of small oscillations of complex EPS. This model of small oscillations must be used together with node voltage equations, determining voltage modules of nodes and their arguments, representing absolute angles relative to the balancing node.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим; (I часть; I part)

1. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М.. Малые колебания электрических систем (матричный подход): Монография. –Ташкент, Fan va tehnologiya, 2011. -316 с.
2. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М.. Матричные методы анализа малых колебаний электрических систем: Монография. –Ташкент, Fan va tehnologiya, 2016. -435 с.
3. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. К применению матричного анализа исследования статической устойчивости электрических систем.//Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2009.- №3-4. С.15-25.(05.00.00; №21)
4. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Исследование качества переходного процесса электрической системы при малых возмущениях.//Проблемы Энерго- и ресурсосбережения.- Ташкент, 2010.- №1-2. С.53-57. (05.00.00; №21)
5. Мирзабаев А.М. Исследование статической устойчивости сложной электрической системы функции Ляпунова в квадратичной форме. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения.- Ташкент, 2012. - №3-4. - С. 20-28. (05.00.00; №21)
6. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Упрощенный критерий статической ус

- тойчивости электрических систем.//Проблемы энерго- и ресурсосбережения. - Ташкент, 2013. - №1-2. -С. 10-18. (05.00.00; №21)
7. Мирзабаев А.М. Совместное применение узловых уравнений и функции Ляпунова в квадратичной форме для анализа статической устойчивости электрической системы. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения.- Ташкент, 2013.- №1-2. -С. 25-33. (05.00.00; №21)
8. 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. (05.00.00; №21)
9. Allaev K.R., Mirzabaev A.M., Makhmudov T.F., Makhkamov T.A. Matrix Analysis of Steady–State Stability of Electric Power Systems. American Association for Science and Technology (AASCIT Journals, AASCIT Communications), 2015.Volume 2.-№ 3.pp 74-82. ISSN: 2375–3803. (05.00.00; №1)
10. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Махкамов Т.А. Применение технологии вложения систем для исследования малых колебаний в регулируемой электрической системе.//Проблемы энерго- и ресурсосбережения.- Ташкент, 2015. №1-2. - С. 32-41. (05.00.00; №21)