

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

На правах рукопису

**КУЄВДА ЮЛІЯ ВАЛЕРІЇВНА**

УДК 681.513.5:621.313.322-81

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОГО  
РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ ТУРБОАГРЕГАТОМ  
В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання та енергоменеджменту Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Балюта Сергій Миколайович**,  
Національний університет харчових технологій, м. Київ,  
завідувач кафедри електропостачання та енергоменеджменту.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Тимченко Віктор Леонідович**,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,  
професор кафедри морського приладобудування

кандидат технічних наук, доцент,  
**Решетюк Володимир Михайлович**,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,  
доцент кафедри автоматики та робототехнічних систем імені академіка І. І. Мартиненка

Захист відбудеться «3» квітня 2019 року о 15-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «1» березня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К 26.058.05,  
к. т. н., доцент

Л. О. Власенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При роботі турбоагрегата (ТА) в електроенергетичній системі (ЕЕС) виникають збурення, які обумовлені симетричними та несиметричними короткими замиканнями в електричній мережі, комутаціями окремих елементів електричної мережі, включенням ємностей поздовжньої компенсації, що можуть спричинити появу субсинхронних резонансних режимів, несинхронними включеннями турбогенераторів в мережу, автоматичними повторними включеннями ліній електропередачі. В результаті дії збурень і взаємодії ТА з електроенергетичною системою виникають низькочастотні коливання і механічні крутильні вібрації у валопроводі ТА, які обумовлюють накопичення втомної пошкоджуваності матеріалу валопроводу ТА, суттєво зменшують ресурс ТА і призводять до передчасного виводу ТА з експлуатації. Для гасіння низькочастотних коливань і забезпечення стійкої роботи в електроенергетичній системі ТА оснащуються автоматизованими системами керування струму збудження генератора та частоти обертання турбіни, які, як правило, проектуються у вигляді окремих незалежних лінійних підсистем і не завжди забезпечують ефективне демпфування крутильних коливань. Оскільки турбіна і синхронний генератор – це взаємопов'язані об'єкти в складі окремого турбоагрегата, канали керування збудженням і частотою обертання істотно впливають один на одного, суттєво погіршуючи якість керування. Вирішення проблеми крутильних коливань і демпфування низькочастотних коливань валопроводу ТА може забезпечуватися шляхом розробки автоматизованої системи взаємозв'язаного керування струмом збудження генератора і частотою обертання турбіни з використанням інформаційних технологій та функцією оцінювання стану валопроводу ТА. Синтез такої системи керування доцільно проводити з використанням методів робастного керування, враховуючи ту обставину, що робота ТА в енергосистемі відбувається в умовах невизначеності, обумовленої зміною режиму роботи ТА (нормальні та аномальні режими, зміна навантаження, конфігурації та складу електричної мережі), тобто при варіюванні параметрів ТА як об'єкта керування.

Таким чином розробка методології синтезу системи керування ТА в умовах невизначеності на принципах взаємозв'язаності та робастності, основним призначенням якої є забезпечення якісного демпфування крутильних і низькочастотних електромеханічних коливань валопроводу ТА для зменшення накопичення втомної пошкоджуваності матеріалу валопроводу ТА і забезпечення його довговічності, є актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри електропостачання та енергоменеджменту Національного університету харчових технологій «Енергозберігаючі системи автоматизованого керування технологічними об'єктами» (номер державної реєстрації 0113U008161), «Керування електропостачанням та електроспоживанням промислових підприємств» (номер державної реєстрації 0117U003555) та «Розрахункове дослідження крутильних моментів, що діють на валопровід генератор-турбіна потужного турбогенератора під час аномальних режимів його роботи» (номер державної реєстрації 0112U005649).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є забезпечення довговічності та надійності роботи ТА у різноманітних перехідних процесах в енергосистемі шляхом створення автоматизованої системи робастного взаємозв'язаного керування турбоагрегатом з функцією контролю стану валопроводу ТА.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі наукові завдання:

- провести системний аналіз процесів керування ТА і розробити підходи до побудови автоматизованої системи керування турбоагрегатом, яка забезпечить структурування і цілісність процесу керування та узгодження роботи окремих її підсистем і функцій;

- розробити структурні рішення, методи та засоби керування ТА з використанням методів робастного керування та ідентифікації, спрямованих на покращення демпфувальних властивостей об'єкта керування та забезпечення надійності роботи ТА;

- дослідити математичні моделі ТА, які мають відповідну складність та забезпечують необхідну точність і адекватність опису об'єкта керування для окремих етапів дослідження;

- розробити процедури ідентифікації параметрів моделі ТА, що працює на електричну мережу, та встановлення меж невизначеності цих параметрів;

- розвинути метод синтезу робастних регуляторів автоматизованої системи взаємозв'язаного робастного керування ТА для заданих невизначеностей;

- розробити спосіб зміни демпфувальних властивостей турбоагрегата з використанням асинхронної машини;

- створити комп'ютерні моделі системи керування ТА і провести імітаційне моделювання з оцінкою ефективності застосування запропонованих технічних рішень для різних режимів роботи ТА в електричній мережі;

- розробити функціональну структуру підсистеми моніторингу стану валопроводу ТА.

*Об'єктом дослідження* є процеси в системах автоматизованого керування ТА при різних режимах електроенергетичної системи.

*Предметом дослідження* є моделі та алгоритми робастного взаємозв'язаного керування ТА і моніторингу стану валопроводу ТА, процедури ідентифікації моделі об'єкта керування.

*Методи дослідження:* для вирішення поставлених завдань використовується теорія автоматичного керування, генетичні та градієнтні алгоритми оптимізації, методи ідентифікації, методи синтезу робастних регуляторів, теорія лінійних матричних нерівностей, методи розрахунку пошкоджуваності при змінних навантаженнях, методи імітаційного аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше запропоновано структуру автоматизованої системи керування турбоагрегатом, яка за допомогою використання методів робастного керування та врахування взаємного впливу підсистем регулювання струму збудження та регулювання частоти обертання турбіни дозволяє покращити демпфувальні

властивості і робастні характеристики турбоагрегата при збуреннях режиму електричної мережі;

- розвинуто метод синтезу взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата за  $H_{\infty}$ -теорією з одночасним заданням коренів характеристичного полінома передавальної функції замкненої системи, які розміщують в області, заданій за допомогою лінійних матричних нерівностей, що забезпечує збільшення затухання електромеханічних коливань валопроводу турбоагрегата, який працює в електроенергетичній системі;

- надано подальшого розвитку теорії  $\mu$ -синтезу шляхом зміни процедури  $D$ - $K$  ітерацій за рахунок використання лінійних матричних нерівностей на окремих етапах синтезу робастного регулятора, що дозволяє забезпечити демпфувальні характеристики об'єкта керування в умовах невизначеності;

- вперше розроблено процедуру ідентифікації матричної передавальної функції об'єкта керування, який складається з турбоагрегата з первинними системами керування (автоматичним регулятором збудження генератора і автоматичним регулятором частоти обертання турбіни) та елементів електричної мережі, на основі методу мінімізації норми помилки прогнозу, що дозволяє ідентифікувати лінійну неперервну математичну модель турбоагрегата у вигляді матричної передавальної функції та встановлювати межі її невизначеності для різних режимів функціонування турбоагрегата при синтезі робастного регулятора турбоагрегата;

- вперше розроблено процедуру ідентифікації параметрів механічної системи турбоагрегата за експериментальними даними з використанням методів спряжених градієнтів та генетичних алгоритмів, яка дозволяє отримати спрощену математичну модель турбоагрегата при збереженні її точності;

- вперше запропоновано спосіб зміни демпфувальних властивостей турбоагрегата за допомогою динамічного компенсатора крутильних коливань на основі асинхронної машини, зокрема з векторним керуванням;

- розвинуто метод моніторингу стану валопроводу турбоагрегата з використанням автоматизованої системи взаємозв'язаного робастного керування турбоагрегатом та оцінки пошкоджуваності валопроводу турбоагрегата при різних режимах його роботи.

**Практичне значення отриманих результатів.** За результатами теоретичних та розрахункових досліджень розроблено алгоритми взаємозв'язаного робастного керування ТА, спосіб зміни демпфувальних властивостей ТА за допомогою динамічного компенсатора крутильних коливань, структуру автоматизованої системи взаємозв'язаного робастного керування ТА. Виконано комп'ютерне моделювання окремих функцій розробленої системи керування.

Одержані результати можуть бути використані при проектуванні, розробці та впровадженні нових або вдосконаленні існуючих систем автоматизованого керування турбоагрегатами.

Результати дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі Національного університету харчових технологій кафедри електропостачання та енергоменеджменту та передані для використання на промислові підприємства

ТОВ «Фірма ТМА» та ТОВ «Промелектропроект», що підтверджено відповідними довідками.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. У публікаціях у співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: в [1] розвинуто методи синтезу взаємозв'язаних робастних регуляторів для керування турбоагрегатом на основі  $H_{\infty}$ -теорії з одночасним розміщенням полюсів передавальної функції замкненої системи, синтезовано регулятор та протестовано на імітаційній моделі, в [2] застосовано метод  $\mu$ -синтезу для синтезу взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата в умовах невизначеності, в [3] спроектовано динамічний компенсатор крутильних коливань, створено його математичну модель та проведено імітаційне моделювання несинхронного включення турбогенератора в мережу з урахуванням динамічного компенсатора, в [4] розроблено та протестовано на імітаційній моделі процедуру ідентифікації параметрів моделі валопроводу турбоагрегата, в [5] досліджено математичну модель турбоагрегата та проведено імітаційне моделювання несинхронного включення у мережу з оцінкою пошкоджуваності матеріалу валопроводу, в [6] визначено електромагнітні моменти, що діють на ротор турбогенератора при несинхронному підключенні до мережі, в [21] визначено електромагнітні моменти, що діють на ротор турбогенератора ТГВ-200 при трифазних коротких замиканнях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались та обговорювались на: Міжнародних наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів (Київ, 2013-2018), The second North and East European congress on food (Київ, 2013), The 8th Central European Congress on Food IV (Київ, 2015), Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ'17» (Вінниця, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (Київ, 2017), IV Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2017), Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика-2018» (Львів, 2018), V Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2018).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України (5 з них включені в до міжнародних наукометричних баз даних), 1 стаття в науково-виробничому журналі, 14 тез доповідей, 2 патенти на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 215 сторінок. Робота містить 68 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел, що налічує 173 найменування, та 5 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження.

В першому розділі наведено аналіз проблеми та постановку задач дослідження.

Проведено системний аналіз теплових електростанцій (ТЕС), енергоблоків (ЕН) і ТА як об'єктів керування та аналіз процесу керування ними, який включає аналіз структури, функцій та мети систем керування цими об'єктами в складі ЕЕС.

Основними складовими ТЕС є енергоблоки, які містять котлоагрегат (КА) та ТА, який зі свого боку включає турбіну (Т) і турбогенератор (ТГ). Т та ТГ пов'язані між собою за допомогою загального валопроводу, який складається з елементів турбіни та ротора турбогенератора, що поєднані між собою муфтами. На нижньому рівні основна задача керування ЕН реалізується за допомогою автономних автоматичних систем регулювання котлоагрегата (АСРКА), турбіни (АСРТ) та турбогенератора (АСРТГ) (Рис. 1). Основними первинними автоматичними регуляторами відповідно є автоматичний регулятор частоти обертання турбіни (АРЧО) в складі АСРТ і автоматичний регулятор збудження генератора (АРЗ) в складі АСРТГ.

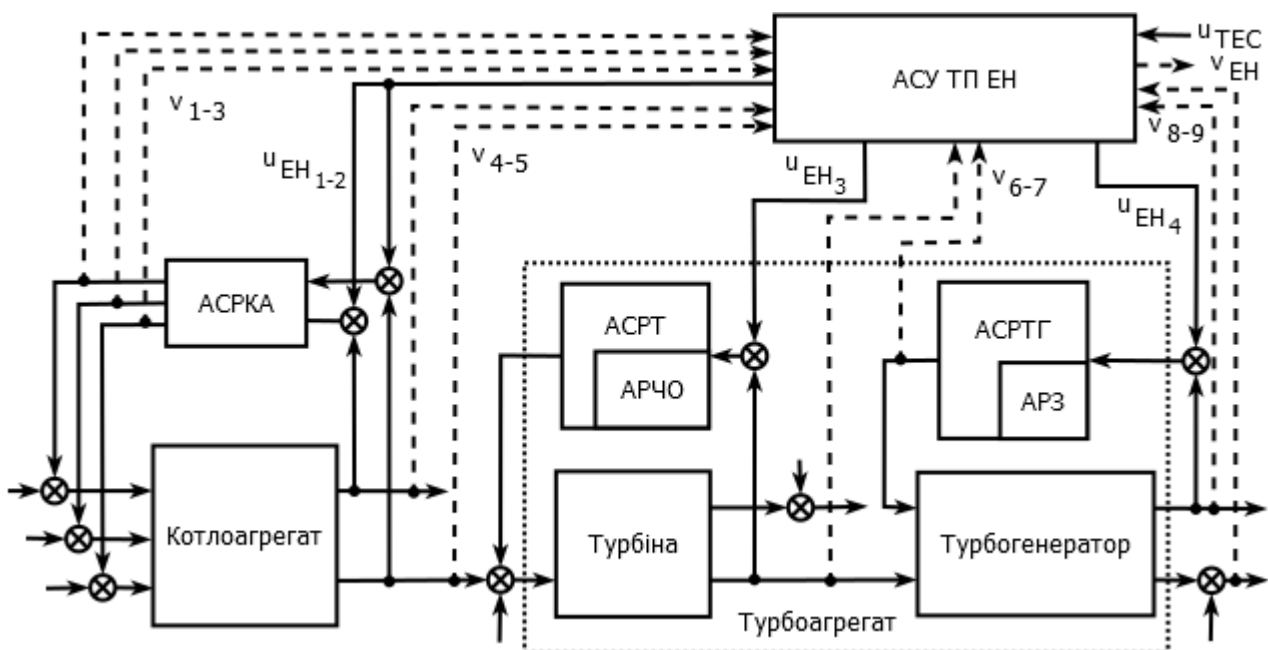


Рис. 1. АСР складових частин енергоблока  
( $u$  – керувальні сигнали,  $v$  – інформаційні сигнали)

ТА як об'єкт керування має такі основні особливості: різка відмінність динамічних властивостей підсистем, з яких від складений, що призводить до жорсткості системи диференціальних рівнянь в математичних моделях; суттєві особливості пускового режиму роботи, що обумовлює спеціальну логіку роботи автоматизованої системи управління технологічним процесом енергоблоку (АСУ ТП ЕН) в цьому режимі; відмінності автономної та паралельної з ЕЕС роботи, при яких налаштування регуляторів відрізняються; суттєва нелінійність динаміки перехідних процесів, що ускладнює роботу з лінеаризованими моделями ТА; широкий спектр частот коливань в процесі роботи, що потребує розробки

математичних моделей, які повинні відображати динамічні властивості ТА на достатньо широкому діапазоні частот, а також необхідність якісного демпфування коливань на цих частотах; наявність протяжного валопроводу, властивості якого обумовлюють крутильні коливання з частотою, близькою до промислової частоти електричної мережі або з частотами, які генеруються встановленими у мережі електротехнічними пристроями, що негативно впливає на залишковий ресурс ТА.

Проведений аналіз схем і методів автоматизованого керування синхронними генераторами та турбінами як складовими частинами ТА показав, що: АРЗ і АРЧО, які можуть вирішувати спільну задачу забезпечення стійкості роботи та гасіння електромеханічних коливань валопроводу ТА, налаштовуються незалежно, тому постає задача їх взаємозв'язаності та необхідності виділення ще одного рівня регулювання АСУ ТП ЕН – АСР ТА; моделі, які описують електромеханічні процеси ТА є нелінійними, а параметри можуть змінюватись в процесі роботи або бути відомі неточно в деяких межах, звідси постає задача робастності автоматичних регуляторів ТА; наявність протяжного валопроводу обумовлює крутильні коливання та накопичення втомної пошкоджуваності матеріалу валопроводу, що збільшує ймовірність передчасного виводу ТА з експлуатації і в гіршому випадку призводить до аварій, тому ці процеси потрібно враховувати при налагодженні регуляторів з метою раціонального використання залишкового ресурсу ТА; неузгоджені дії автоматичних регуляторів частоти обертання турбіни та регулятора збудження турбогенератора можуть негативно впливати на роботу ТА і стан валопроводу. Відомі методи скоординованого керування турбіною та генератором за допомогою узгодженого налагодження первинних регуляторів агрегата передбачають лише зміну параметрів існуючих регуляторів при незмінній їх структурі і не дозволяють отримати принципово нових властивостей керування.

Виконаний аналіз систем збудження турбогенераторів показав, що: недоліком існуючих автоматичних регуляторів збудження синхронних машин є те, що вони не забезпечують ефективного демпфування крутильних коливань валопроводу ТА; не досліджені їх робастні властивості відносно параметрів ТА. Також налагодження згаданих регуляторів не узгоджується з налагодженням первинного регулятора частоти обертання турбіни турбоагрегата. Таким чином, ці регулятори не використовують всіх існуючих можливостей для регулювання з метою демпфування крутильних коливань валопроводу та забезпечення стійкості роботи турбогенератора в електричній системі.

Проведено аналіз і вказані особливості автоматичного регулювання частоти обертання турбіни. Встановлено, що основний напрям вдосконалення систем регулювання потужних парових турбін пов'язаний з переходом до цифрового регулювання на базі мікропроцесорної техніки і потребує нових методів налаштування параметрів регуляторів.

Проведено аналіз умов надійної роботи ТА. Встановлено, що важливим є контроль крутильних електромеханічних коливань валопроводу ТА, які впливають на термін його служби. Вивчення крутильних коливань валопроводів потужних ТА обумовлюється необхідністю забезпечення міцності валів при їх експлуатації в складних аномальних режимах, коли різка зміна параметрів режимів може призвести до виникнення діючих на валопровід електромагнітних збурювальних



моментів і крутих моментів в перетинах валопроводу, при яких будуть перевищені допустимі напруження, обумовлені короткими замиканнями. Крім того, в практиці зустрічались випадки виникнення крутильних коливань внаслідок певних некоректних налагоджень первинних регуляторів ТА, причому це стосується як АРЧО, так і АРЗ. Наведені факти обумовлюють необхідність розробки автоматизованої системи керування турбоагрегатом з функцією моніторингу стану валопроводу в умовах різних режимів роботи.

Проведено аналіз методів робастного керування та їх використання для синтезу систем керування турбоагрегатом. Розділ завершується обґрунтуванням і формулюванням мети та задач дисертаційної роботи.

**В другому розділі** описано математичні моделі ТА в складі ЕЕС як об'єкта керування та процедури їх ідентифікації.

Для дослідження використано повну нелінійну математичну модель ТА у вигляді об'єднаного об'єкта керування (ООК), що включає ТГ, Т, збудник (З), АРЗ, АРЧО, блочний трансформатор, тестову електричну мережу (ТЕМ). Зведену математичну модель ООК представимо таким чином:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= F(x(t)) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x$  – вектор стану;  $F(x)$  – нелінійна матричнозначна функція;  $y = \omega - \omega_{уст}$  – вектор спостережень: відхилення частоти обертання ротора генератора;  $B, C, D$  – матриці зі сталими коефіцієнтами;  $u = (u_{АРЗ} \quad u_{АРЧО})^T$  – вектор керування, що складається з сигналів керування додаткових стабілізаційних входів до АРЧО та АРЗ.

Однією з задач розробки системи керування ТА є забезпечення демпфування крутильних коливань його протяжного валопроводу в аномальних режимах. Це обумовило врахування властивостей валопроводу шляхом включення його багатомасової пружно-крутильної моделі в склад системи (1)

$$\mathbf{J} \frac{d}{dt} \omega = -\mathbf{C} \varphi - \mathbf{D} \omega + M_{ТГ} - M_{Т}, \quad \frac{d}{dt} \varphi = \omega, \quad (2)$$

де  $\varphi, \omega$  – вектори, елементами яких є кути закручування та кутові швидкості точкових мас валопроводу,  $M_{ТГ}, M_{Т}$  – матриці моментів генератора та турбіни,  $\mathbf{J}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  – матриці моментів інерції точкових мас, жорсткостей пружних зв'язків та коефіцієнтів демпфування крутильних коливань.

Для багатомасової моделі валопроводу ТА (2), постає питання вибору доцільної кількості точкових мас. Порівняно детальну модель, в якій кожна ділянка валопроводу постійного діаметра враховується як точкова маса, а число ділянок досягає 100-200, та модель з агрегованими масами, де кількість точкових мас відповідає кількості ступенів турбіни разом з масою генератора, тобто 2-5. Для обґрунтування вибору математичної моделі, яка дозволить з достатньою точністю оцінити вплив системи керування на крутильні коливання ТА, був виконаний чисельний експеримент, який показав, що без суттєвої втрати точності доцільно використовувати математичну модель валопроводу з агрегованими масами. Для забезпечення точності вказаної моделі використана розроблена процедура

параметричної ідентифікації шляхом наближення власних частот спрощеної математичної моделі до розрахункових власних частот детальної математичної моделі або частот, які визначені з експерименту.

Алгоритм ідентифікації параметрів валопроводу полягає в наступному. Виходячи з геометричних та фізичних характеристик, знаходяться початкові наближені значення параметрів матриць  $\mathbf{J}$  та  $\mathbf{C}$  моделі валопроводу (2). Якщо власні числа матриці  $\mathbf{J}^{-1}\mathbf{C}$  позначити як  $\lambda_i$ , тоді власні частоти коливань

дорівнюють  $\nu_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi}$ . Нехай  $\nu_i$  – визначені з експерименту чи за детальною

моделлю перші  $n$  власних частот коливань, а  $\tilde{\nu}_i$  – частоти спрощеної системи. Тоді цільова функція для визначення параметрів моделі виражається таким чином:

$F = \sum_{i=1}^n (\nu_i - \tilde{\nu}_i)^2$ . Цільова функція мінімізується за всіма параметрами  $F(\mathbf{J}, \mathbf{C}) \rightarrow \min$

або за окремим набором параметрів, наприклад, за коефіцієнтами жорсткості, тобто  $F(\mathbf{C}) \rightarrow \min$ . Вводяться додаткові обмеження на коефіцієнти матриці  $\mathbf{C}$ , користуючись початковим наближенням та окресленням деякого околу цієї точки:  $C_{\min} \leq C_{i,j} \leq C_{\max}$ . В роботі для мінімізації  $F(\mathbf{C})$  застосовано методи спряжених градієнтів (СГ) та генетичного алгоритму (ГА).

Проведені розрахункові дослідження показали, що метод ГА доцільно застосовувати для пошуку наближення до глобального екстремуму та області однокстремальності функції, а метод СГ – для швидкого уточнення знайденого наближення до бажаної точності.

Крутильні коливання валопроводу впливають на пошкоджуваність його матеріалу, тому цей показник контролюється в рамках спостереження за залишковим ресурсом ГА при вирішенні задач моніторингу стану матеріалу валопроводу під час роботи ГА, а також проводиться його реєстрація та оцінка в процесі роботи ГА в різних режимах. В роботі проаналізовано різні методи визначення втомної пошкоджуваності матеріалів та обрано метод визначення пошкоджуваності матеріалу валопроводу турбоагрегата на базі теорії лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена-Майнера із застосуванням параметра  $\Pi$

$$\Pi = \sum_{i=1}^s \Pi_i = \sum_{i=1}^s \frac{1}{N_{ip}}, \quad (3)$$

де  $\Pi_i$  – пошкоджуваність матеріалу на  $i$ -му циклі коливань,  $N_{ip}$  – кількість циклів до руйнування з амплітудою  $i$ -го циклу коливань. Виконання умови  $\Pi \geq 1$  означає, що матеріал валопроводу досягає граничного стану.

Для проведення синтезу взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата сформовано математичну модель об'єднаного об'єкта керування, що має 2 адитивні вхідні сигнали:  $u_{APЧO}$  та  $u_{APЗ}$  до APЧO та APЗ відповідно, та 1 вихідний сигнал у – ковзання  $d\omega$  (Рис. 2).

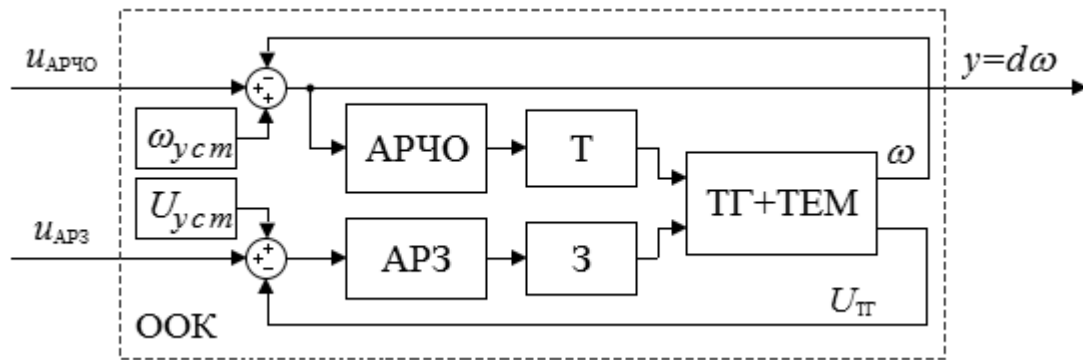


Рис. 2. Схема об'єднаного об'єкта керування

Модель (1) лінеаризовано в околі робочої точки з фіксованими значеннями активної та реактивної потужності  $P$  та  $Q$ , що відповідають певним значенням кута  $\theta$  та напруги генератора  $U_{уст}$ . Для зниження порядку регулятора порядок моделі понижено за допомогою методу Шура. Побудовано відповідну матричну передавальну функцію  $G$  лінеаризованої системи ООК:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = \begin{pmatrix} G^1(s) & G^2(s) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

На базі матричної передавальної функції  $G$  лінеаризованої системи ООК сформовано адитивну модель невизначеності ООК:

$$G_{pert}(s) = G(s) + \Delta(s)W_2(s), \quad (5)$$

де  $\Delta = \begin{pmatrix} \Delta^1 & \Delta^2 \end{pmatrix}$ ,  $\|\Delta\|_\infty < 1$  – нормована невизначеність,  $\|\cdot\|_\infty$  – норма в просторі  $RH_\infty$

всіх стійких правильних дробово-раціональних функцій,  $G^i(s) = \left( \sum_{k=0}^m a_k^i s^k \right)^{-1} \sum_{k=0}^n b_k^i s^k$  – номінальна передавальна функція, що ставиться у відповідність номінальному режиму роботи ТА,  $W_2 = \begin{pmatrix} w^1 & 0 \\ 0 & w^2 \end{pmatrix}$  – вагова функція, яка теж належить  $RH_\infty$ .

Розроблено процедуру активної ідентифікації матричної передавальної функції  $G$  (5) та встановлення границь її невизначеності при зміні фіксованого набору параметрів моделі ООК. Задача ідентифікації полягає в знаходженні передавальних функцій  $G$  та  $W_2$  у виразі (5).

Для ідентифікації  $G$  та  $W_2$  обрано активний ретроспективний метод ідентифікації. З метою порівняння якості ідентифікації функцій використовувалися вхідні сигнали двох типів: «білий шум» та лінійно-модульований сигнал («чирп»-сигнал). Ідентифікацію проведено за даними часових дискретних рядів, використовуючи один з «прямих» методів – метод мінімізації норми помилки прогнозу (prediction error minimization – PEM).

В рамках дослідження процедури ідентифікації було згенеровано набори вхідних даних у формі часових дискретних рядів «білого шуму» і «чирп»-сигналу та вихідних даних, за якими ідентифіковані передавальні функції відповідно  $G_{vn}$  та  $G_{ch}$  у вигляді адитивної моделі невизначеності (5). В якості джерел невизначеності використовувалось варіювання координат вектора стану, в околі якого лінеаризовано рівняння, коефіцієнта  $K_{0u}$  автоматичного регулятора збудження та

конфігурації електричної мережі в частині довжини лінії електропередачі. В частотному діапазоні дії тестових сигналів виконано порівняння ідентифікованих функцій  $G_{wn}$  та  $G_{ch}$  з функцією  $G_{teor}$ , яка була отримана з моделі ТА (1) шляхом лінеаризації та пониження порядку за методом Шура. Порівняння показало співпадіння АЧХ всіх функцій з достатньою точністю в області середніх частот, а також те, що  $G_{ch}$  дає краще наближення до функції  $G_{teor}$ , ніж  $G_{wn}$ .

Для різних етапів дослідження в даній роботі використовуються моделі ООК різного ступеня складності: для імітаційного моделювання, ідентифікації механічної підсистеми та оцінки пошкоджуваності – повна нелінійна багатомасова модель; для ідентифікації параметрів об'єкта керування – лінеаризована модель пониженого порядку; для синтезу робастного взаємозв'язаного регулятора – розширена модель з невизначеностями.

**В третьому розділі** виконано розширення моделі ООК та синтез на її основі двох видів взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата: за алгоритмом  $H_\infty$ -оптимізації з одночасним розміщенням коренів характеристичного полінома (поліосів) передавальної функції замкненої системи в області, описаній за допомогою теорії лінійних матричних нерівностей (ЛМН), та за модифікованою процедурою  $D-K$  ітерацій  $\mu$ -синтезу.

Робастний  $H_\infty$ -субоптимальний взаємозв'язаний регулятор ТА, синтезований з одночасним розміщенням полюсів передавальної функції замкненої системи, крім нечутливості до зміни параметрів ООК забезпечує необхідні демпфувальні характеристики системи керування ТА.

Основною умовою синтезу робастного регулятора є забезпечення робастної стійкості замкненої системи. Стійкість системи з регулятором, що синтезується за даним методом, базується на теоремі про малий коефіцієнт підсилення. Теорема стверджує, що якщо  $M(s) \in RH_\infty$ , де  $RH_\infty$  – простір стійких правильних дробово-раціональних функцій, то матриця  $(I + M(s)\Delta(s))^{-1}$  визначена та належить  $RH_\infty$  при всіх  $\Delta(s) \in RH_\infty$ ,  $\|\Delta(s)\|_\infty \leq 1/\gamma$  тоді та тільки тоді, коли  $\|M(s)\|_\infty < \gamma$ . З цієї теореми випливає, що якщо прийняти адитивну модель невизначеностей  $G_{pert} = G + \Delta W_2$ , де  $G$  – модель ООК з номінальними параметрами,  $\Delta$  – довільна стійка передавальна функція, що відповідає умові  $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ , а  $W_2$  – вагова функція, яка належить  $RH_\infty$ , то робастна стійкість замкненої системи з регулятором  $K(s)$  при всіх  $\|\Delta(s)\|_\infty \leq 1$  має місце тоді, коли  $\|W_2 K S\|_\infty < 1$ , де  $S = (I + G(s)K(s))^{-1}$  – функція чутливості.

Виходячи з вищеведеного, одним з критеріїв оптимізації, за якими має проходити пошук оптимального робастного регулятора, буде критерій  $\inf_K \|W_2 K S\|_\infty$ , який також відповідає за обмеженість керування. Вимоги до керувального сигналу задаються ваговою функцією  $W_2'$ . Відповідно для забезпечення зазначеного критерію з  $W_2$  та  $W_2'$  обирається вагова функція, графік максимального сингулярного числа  $\bar{\sigma}(i\omega)$  якої лежить вище.

Для забезпечення вимог якості керування вводиться ще один критерій, який необхідно оптимізувати разом з представленим вище:  $\inf_K \|W_1 S\|_\infty$ , де  $W_1 \in RH_\infty$  – вагова функція, яка має вигляд  $W_1 = \frac{1}{S_\infty} \frac{s + \omega_1}{s + \omega_\varepsilon}$ . Цей критерій витікає з вимоги мінімізації помилки регулювання та має забезпечувати високу якість відстеження та гасіння збурень на виході об'єкта.

Оскільки за допомогою ваги  $W_1$  складно задати обмеження на коливальність перехідного процесу, яка повинна забезпечити необхідні демпфувальні характеристики системи, до умов, що задаються у вигляді:

$$\inf_K \left\| \begin{matrix} W_1 S \\ W_2 K S \end{matrix} \right\|_\infty, \quad (6)$$

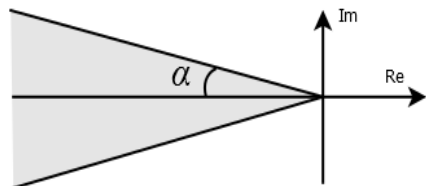
вводять додаткове обмеження на полюси замкненої системи у вигляді областей комплексної площини, які допускають опис у вигляді ЛМН.

Області на комплексній площині задаються за допомогою виразів вигляду

$$D = \{z \in C \mid L + zM + \bar{z}M^T < 0\}, \quad (7)$$

де  $L$  – симетрична матриця  $m \times m$ ,  $M$  – матриця  $m \times m$ . Матричнозначна функція  $f_D = L + zM + \bar{z}M^T$  називається характеристичною функцією області  $D$ .

Область «конічний сектор» (рис. 3) гарантує коефіцієнт демпфування не менше  $\xi = \cos \alpha$  або коливальність  $\mu$  не більше  $\mu = \operatorname{tg} \alpha$ , де



$\mu = \frac{\operatorname{Im} p}{\operatorname{Re} p}$ , а  $p$  – комплексні корені замкненої системи.

Область  $D$  конічного сектора виражається через ЛМН

$$D = \left\{ z \in C \mid \begin{pmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ -\cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} z + \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha \\ \cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} \bar{z} < 0 \right\}.$$

Рис.3. Область обмеження полюсів «конічний сектор»

Матриця  $A$  називається  $D$ -стійкою, якщо усі її власні числа лежать в області  $D$ . Якщо матриці  $L$  та  $M$  в (7) мають елементи  $\lambda_{kl}$  та  $\mu_{kl}$  відповідно, вводиться блочна матриця  $M_D(A, X)$  у вигляді  $M_D(A, X) = (\lambda_{kl} X + \mu_{kl} AX + \mu_{lk} XA^T)$ . Матриця  $A$  є  $D$ -стійкою тоді і тільки тоді, коли існує симетрична матриця  $X > 0$ , така, що

$$M_D(A, X) < 0, \quad (8)$$

що є узагальненням класичної умови Ляпунова стійкості матриці  $A$  про існування симетричної матриці  $X > 0$ , такої, що  $AX + XA^T < 0$ .

Синтез регулятора полягає в сумісному розв'язанні ЛМН, які відповідають мінімізації критерію (6) та  $D$ -стійкої матриці системи (8).

Для застосування теорії оптимізації за  $H_\infty$ -нормою модель ООК (2) розширено до системи  $P$  (рис. 4) і включено регулятор  $K$ .

Задача синтезу  $H_\infty$ -субоптимального регулятора за вихідним сигналом у формулюється як знаходження регулятора  $u = K(s)y$  та мінімального  $\gamma$ ,

відповідного обмеженню невизначеності  $\|\Delta(s)\|_{\infty} \leq 1/\gamma$ , таких, що полюси замкненої системи належать заданій за допомогою ЛМН  $D$ -області та виконується нерівність  $\|T_{dz}\| < \gamma$ , де передавальна функція  $T_{dz} = \begin{pmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \end{pmatrix}$ .

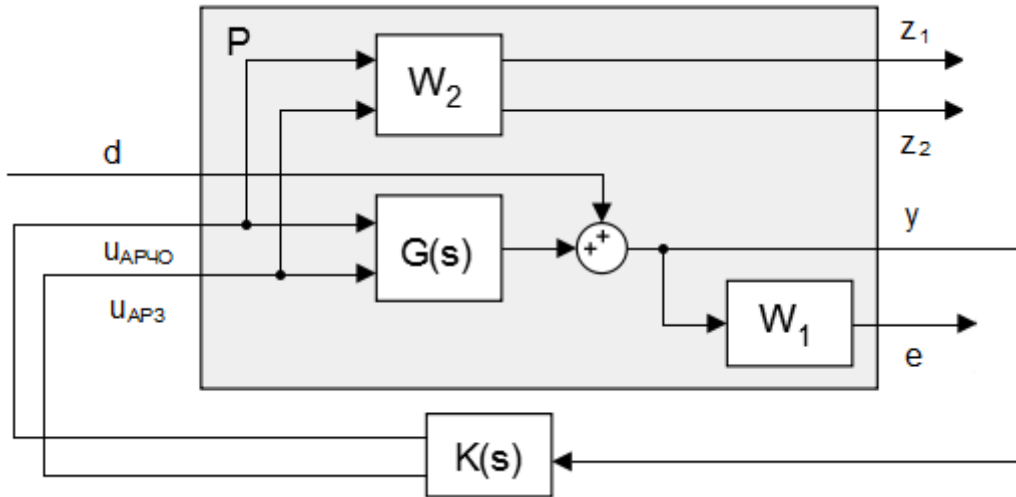


Рис. 4. Розширення моделі ООК

За описаною процедурою синтезовано робастний взаємозв'язаний регулятор  $K(s)$  для ООК, що включає ТГ ТГВ-200, електричну мережу та турбіну К-200-130, при цьому полюси номінальної замкненої системи лежать в заданій області кінцевого сектору (рис. 5).

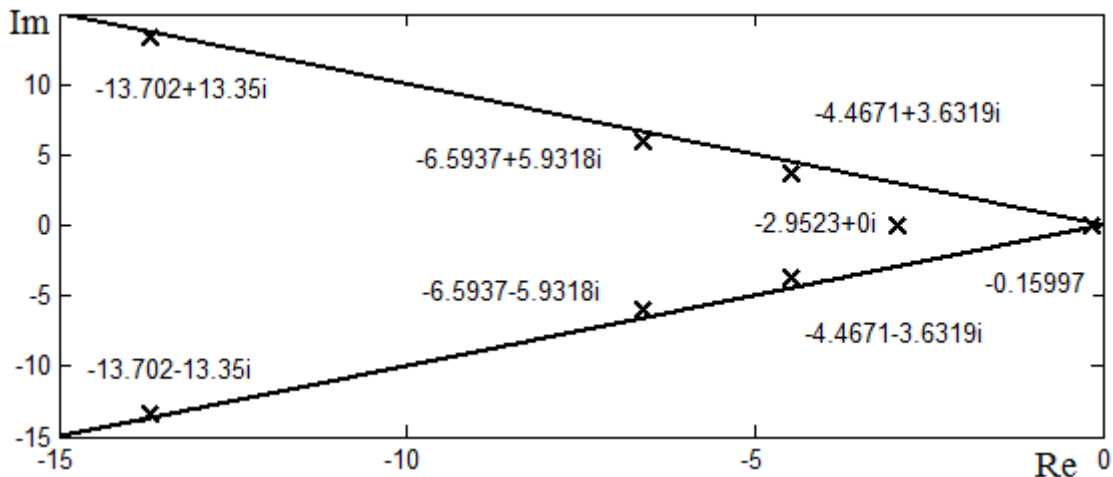


Рис. 5. Полюси замкненої системи

Відомо, що  $H_{\infty}$ -оптимальні регулятори забезпечують робастну стійкість та номінальну якість. Проте, особливістю процедури  $\mu$ -синтезу є те, що вона дозволяє забезпечити як робастну стійкість, так і робастну якість системи. Метод  $\mu$ -синтезу, як і синтезу  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора, використовує вагові функції, які не дозволяють в явному вигляді задати умови на коливальність перехідного процесу. З метою гарантованого забезпечення умов коливальності перехідного процесу запропоновано алгоритм синтезу взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата з використанням модифікованої процедури  $D$ - $K$  ітерацій  $\mu$ -синтезу.

Для побудови алгоритму  $\mu$ -синтезу робастного регулятора, систему представлено в  $M$ - $\Delta$  конфігурації (рис. 6) і застосовано процедуру дробово-лінійного перетворення, яка виділяє всі невизначеності в окремий блок. На схемі рис. 6 відповідно:  $P$  – розширена модель ООК,  $K$  – регулятор, який синтезується; разом вони складають блок  $M(P, K)$ , а  $\Delta$  – матрична передавальна функція обмеженої системи невизначеностей, така що  $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1/\gamma$ .

Матриця невизначеностей моделі представляється у структурованому вигляді  $\Delta = \text{diag}[\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_f]$ ,  $\delta_i \in C$ ,  $\Delta_j \in C^{m_j \times m_j}$ , де перша частина відповідає за параметричні невизначеності, а друга – за частотні.

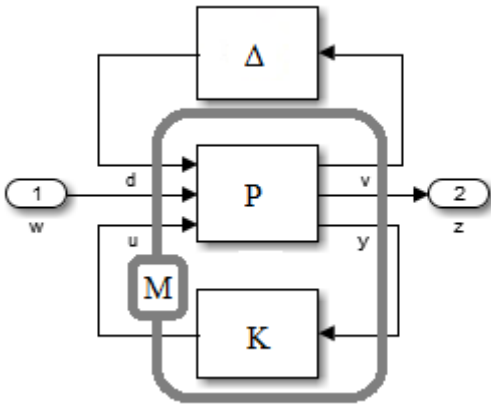


Рис. 6. Стандартна  $M$ - $\Delta$  конфігурація з регулятором  $K$

В теорії  $\mu$ -синтезу використовується поняття структурного сингулярного числа  $\mu_{\Delta}(M)$ :

$$\mu_{\Delta}(M) = \left[ \min_{\Delta \in \Omega} \{\bar{\sigma}(\Delta) : \det(I - M\Delta) = 0\} \right]^{-1},$$

відповідно  $\mu_{\Delta}(M(s)) = \sup_{\omega} \mu_{\Delta}(M(j\omega))$ , де  $\Omega$  –

множина структурованих матриць для даної моделі об'єкта. Відомо, що система з невизначеністю  $\Delta \in \Omega$  при  $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1/\gamma$  робастно стійка тоді та тільки тоді, коли  $\mu_{\Delta}(M(s)) < \gamma$ .

Виходячи з цього твердження формується алгоритм  $\mu$ -синтезу.

Ціллю  $\mu$ -синтезу є знаходження такого регулятора  $K(s)$ , який мінімізує  $\mu_{\Delta}(M(P, K))$ . Прямого алгоритму розв'язку такої задачі не існує, але відомо її переформулювання у відповідну задачу  $H_{\infty}$ -оптимізації, для якої існує процедура розв'язання, яка покладена в основу процедури  $D$ - $K$ -ітерацій. Для множини функцій  $D(s)$  такої ж структури як і  $\Delta$ , виконується така нерівність  $\mu_{\Delta}(M(s)) \leq \inf_D \|DM(P, K)D^{-1}\|_{\infty}$ . При цьому для кожної фіксованої  $D(s)$  задача  $\inf_{K(s)} \|DM(P, K)D^{-1}\|_{\infty}$  є стандартною задачею  $H_{\infty}$ -оптимізації. Тому процедура  $D$ - $K$ -ітерацій, що розв'язує задачу  $\mu$ -синтезу, полягає у наступному:

- 1- задають початкове значення  $D(s)$ , зазвичай у вигляді одиничної матриці;
- 2- фіксують  $D(s)$  та розв'язують задачу  $\inf_{K(s)} \|DM(P, K)D^{-1}\|_{\infty}$   $H_{\infty}$ -оптимізації для  $K$ ;
- 3- фіксують  $K$  та знаходять таку функцію  $D(j\omega)$ , яка апроксимує знайдений на обраній сітці частот  $\omega_i, i = \overline{1, N}$  чисельний розв'язок задач  $\inf_{D_i} \|D_i M_i D_i^{-1}\|_2$ , де  $D_i = D(j\omega_i)$ ,  $M_i = M(j\omega_i)$ . Далі переходять до пункту 2, поки не досягнуть достатньої точності.

В роботі запропоновано модифікацію цього алгоритму для синтезу регулятора за виходом  $u = K(s)y$ , який є не тільки нечутливим до обраних невизначеностей заданого рівня, але забезпечує попадання полюсів передавальної функції замкненої

системи в обрану область, яка визначена через ЛМН. З цією метою модифікується етап 2 алгоритму, на якому знаходиться передавальна функція регулятора  $K(s)$ . Задача  $H_\infty$ -оптимізації  $\inf_{K(s)} \|DM(P,K)D^{-1}\|_\infty$  на етапі 2 зводиться до знаходження  $H_\infty$ -оптимального регулятора  $K(s)$  для модифікованого об'єкта з передавальною функцією  $\tilde{P}$  за критерієм  $\inf_{K(s)} \|M(\tilde{P},K)\|_\infty$ . Така задача розв'язується за допомогою алгоритму  $H_\infty$ -оптимізації з одночасним розміщенням полюсів замкненої системи в заданій області, який описано вище. В роботі показано, що таке переформулювання коректне, а множина полюсів модифікованої замкненої системи  $M(\tilde{P},K)$  включають полюси вихідної замкненої системи  $M(P,K)$ .

За модифікованою процедурою  $D$ - $K$ -ітерацій синтезовано взаємозв'язаний робастний регулятор турбоагрегата  $K_\mu(s)$  для ООК, що включає ТГ ТГВ-200, електричну мережу та турбіну К-200-130.

Проведено імітаційне моделювання турбоагрегата при роботі паралельно з електричною системою: за наявності двох варіантів  $K(s)$  та  $K_\mu(s)$  автоматичного взаємозв'язаного робастного регулятора (АВРР); із стандартним системним стабілізатором (PSS); без додаткових регуляторів – і досліджено робастність АВРР відносно одного з параметрів моделі ООК. На рис. 7 показано перехідний процес ТА в результаті автоматичного повторного включення лінії після короткого замикання при різних значеннях коефіцієнта  $K_{0u}$  АРЗ ТА.

Графіки демонструють меншу коливальність перехідного процесу при застосуванні обох синтезованих АВРР в порівнянні із стандартним системним стабілізатором та найкращі робастні властивості регулятора  $K_\mu(s)$  відносно зміни параметра  $K_{0u}$ .

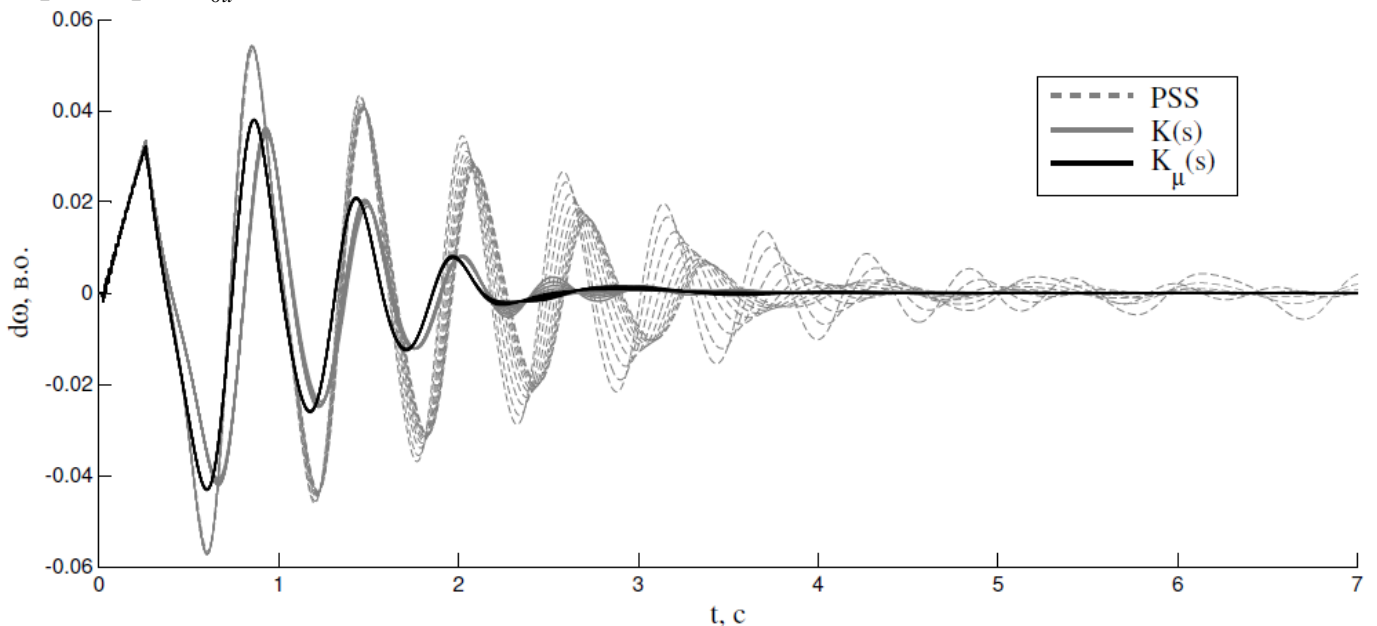


Рис. 7. Результат імітаційного моделювання ТА з АВРР



В четвертому розділі розроблено функціональну структуру автоматизованої системи взаємозв'язаного робастного керування турбоагрегатом (АСК РВ ТА) на основі АВРР з функцією контролю стану валопроводу ТА (Рис. 8).

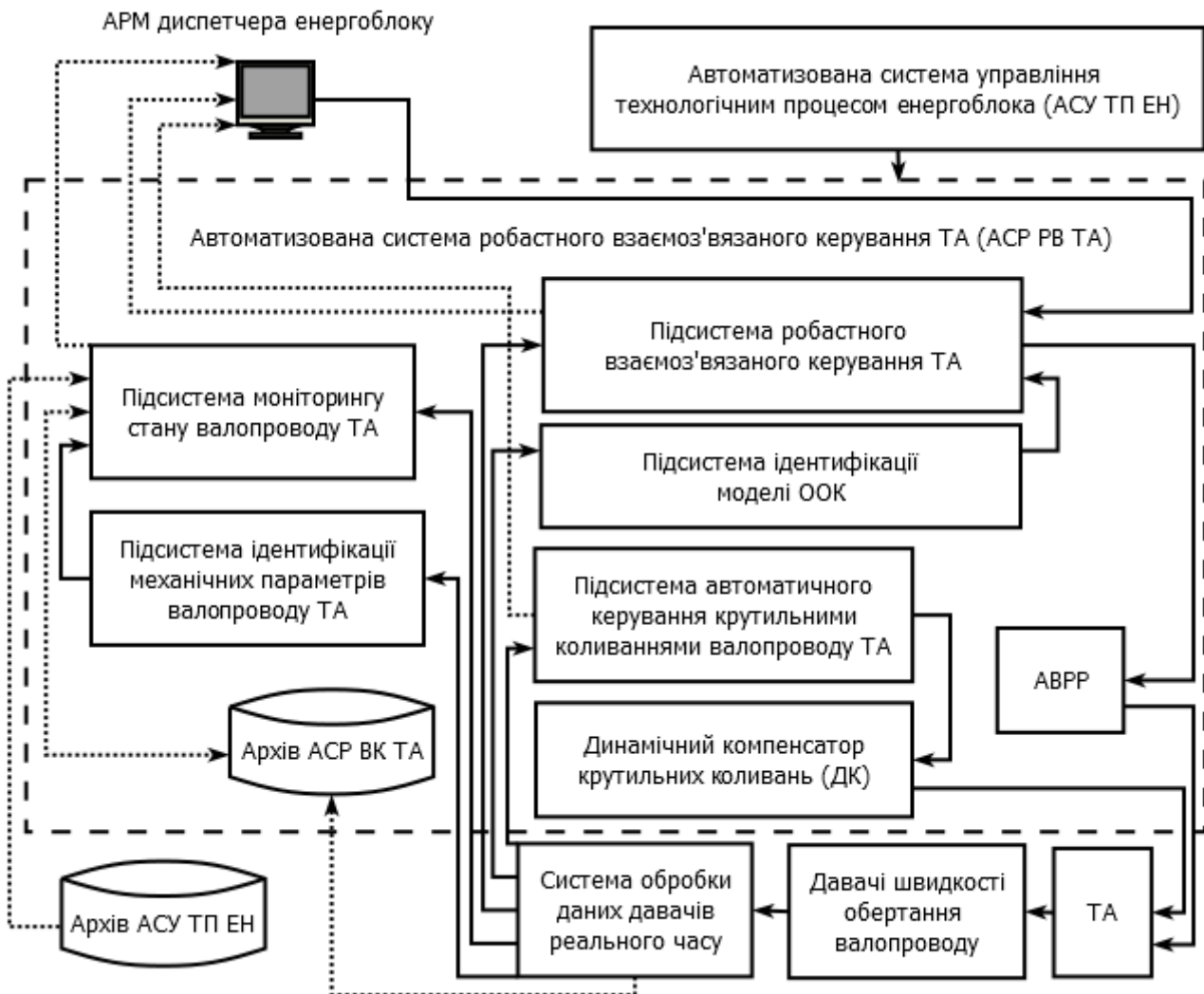


Рис. 8. Функціональна структура АСК РВ ТА

Для реалізації функції моніторингу стану валопроводу ТА використано методи визначення та оцінки пошкоджуваності матеріалу валопроводу ТА, яка є суттєвою складовою залишкового ресурсу ТА. Для обмеження росту пошкоджуваності валопроводу ТА і підвищення ефективності функціонування системи керування використано спроектований динамічний компенсатор крутильних коливань (ДК). Конструктивно ДК є асинхронною машиною (АМ), яка приєднана до одного з кінців валопроводу ТА, виводи обмотки статора АМ підключаються до окремої трифазної мережі зі сталими значеннями напруги і частоти.

В пасивному варіанті ДК – це некерована асинхронна машина, в активному – асинхронна машина з векторним керуванням. В пасивному варіанті ДК реалізує функції гасіння низькочастотних коливань валопроводу, а в активному варіанті забезпечує демпфування крутильних коливань валопроводу шляхом векторного керування АМ із регулятором стану, який синтезовано за допомогою методу задання власних значень замкненого контуру регулювання, та з використанням спостерігача

стану, який визначає змінні параметри стану валопроводу на основі вимірюваної швидкості обертання валопроводу.

Розрахункові дослідження показали, що використання ДК забезпечує значне зменшення амплітуди та тривалості коливань крутних моментів в найбільш напружених перерізах валопроводу ТА під час перехідних електромеханічних процесів, та як наслідок, зменшує накопичення пошкоджень матеріалу валопроводу.

Розроблено функціональну структуру підсистеми моніторингу стану валопроводу з функцією контролю параметра пошкодження матеріалу валопроводу П (3) в режимі реального часу.

Виконано розрахункові дослідження накопичення пошкоджуваності матеріалу валопроводу в аномальних режимах роботи, що дозволить в підсистемі моніторингу стану валопроводу оцінювати залишковий ресурс матеріалу валопроводу за результатами станційної та системної статистики різних видів аномальних процесів в енергосистемі.

## **ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ**

Дисертація присвячена вирішенню комплексу науково-практичних задач забезпечення довговічності та надійності роботи ТА у різноманітних перехідних процесах в енергосистемі шляхом створення автоматизованої системи робастного взаємозв'язаного керування турбоагрегатом з функцією контролю стану валопроводу ТА. Розробка автоматизованої системи взаємозв'язаного керування ТА полягає в організації багаторівневої системи керування з урахуванням взаємного впливу підсистем АРЗ генератора та АРЧО турбіни, використанні локальних та централізованих систем керування і забезпечує покращення демпфувальних характеристик турбоагрегата в умовах невизначеності при збуреннях режиму електричної мережі шляхом використання робастних методів керування, процедур ідентифікації параметрів, моніторингу стану валопроводу з використанням оцінювання пошкоджуваності його матеріалу.

У дисертаційній роботі отримані такі основні наукові та практичні результати:

1. На основі проведеного системного аналізу процесів керування ТА виявлені особливості ТА як об'єкта керування та розроблені підходи до побудови автоматизованої системи керування ТА із забезпеченням структуризації і цілісності процесу керування та узгодження роботи її окремих підсистем і функцій.

2. Вперше вирішений комплекс взаємозв'язаних задач керування ТА з метою підвищення його демпфувальних властивостей при збуреннях режиму електричної мережі в умовах невизначеності та забезпечення надійності його роботи шляхом створення автоматизованої системи взаємозв'язаного робастного керування ТА з використанням методів робастного керування та ідентифікації.

3. Досліджено математичні моделі ТА, які забезпечують необхідну точність і адекватність опису об'єкта керування на окремих етапах дослідження.

4. Розроблено процедуру ідентифікації матричної передавальної функції об'єкта керування, який складається з ТА з первинними системами керування та елементів електричної мережі, на основі методу мінімізації норми помилки прогнозу, що дозволяє ідентифікувати лінійну неперервну математичну модель

об'єкта керування у вигляді матричної передавальної функції та встановлювати межі її невизначеності для різних режимів функціонування ТА.

5. Розроблено процедуру ідентифікації параметрів механічної системи турбоагрегата за експериментальними даними з використанням методів спряжених градієнтів та генетичних алгоритмів, яка дозволяє отримати спрощену математичну модель турбоагрегата при збереженні її точності.

6. Вперше здійснено постановку та розв'язано задачу забезпечити демпфувальні характеристики ТА в умовах невизначеності за рахунок розробки робастного взаємозв'язаного регулятора ТА, який працює в електричній системі, за допомогою методу  $H_\infty$ -теорії з одночасним розміщенням полюсів передавальної функції замкненої системи в  $D$ -області, яка задається за допомогою ЛМН, що дозволило збільшити затухання електромеханічних коливань валопроводу ТА.

7. Розроблено модифіковану процедуру  $D-K$  ітерацій на основі використання ЛМН на окремих етапах, що дозволило забезпечити демпфувальні характеристики об'єкта керування в умовах невизначеності, та застосовано її до  $\mu$ -синтезу робастного взаємозв'язаного регулятора ТА.

8. Створено комп'ютерні моделі системи керування ТА, здійснено імітаційне моделювання запропонованих технічних рішень та досліджено їх ефективність у вирішенні задачі забезпечення надійності ТА.

9. Розроблено спосіб зміни демпфувальних властивостей турбоагрегата шляхом створення та дослідження динамічного компенсатора крутильних коливань на основі асинхронної машини, зокрема з векторним керуванням, що забезпечує ефективне демпфування крутильних і низькочастотних коливань ТА у перехідних режимах.

10. Розроблено функціональну структуру підсистеми моніторингу стану валопроводу ТА з використанням методів оцінювання пошкоджуваності матеріалу валопроводу.

11. Результати дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі кафедри електропостачання та енергоменеджменту Національного університету харчових технологій та передані для використання на промислові підприємства ТОВ «Фірма ТМА» та ТОВ «Промелектропроект», що підтверджується відповідними довідками.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kuievda Yu., Baliuta S. Synthesis of robust interconnected power system stabilizers for turbine generators in sugar factories. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2017. Vol. 5, Issue 2. P. 256-266.

2. Балюта С. М., Куєвда Ю. В. Робастні системи взаємозв'язаного керування турбогенераторами в умовах невизначеності. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*: електрон. наук. фах. вид. 2017. №4. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/519>.

3. Куєвда Ю. В., Куєвда В. П., Балюта С. М. Зменшення крутильних коливань валопроводів потужних турбогенераторів за допомогою асинхронного демпфірувального пристрою. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2017. Вип. 46. С. 50-55.

4. Куєвда Ю. В., Балюта С. М. Методика ідентифікації параметрів пружної моделі валопроводу турбоагрегату для моделювання крутильних коливань. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2017. Вип. 47. С. 37-44.

5. Бовсуновский А. П., Куєвда Ю. В. Учет качаний валопровода турбоагрегата при оценке усталостной поврежденности его элементов в процессе успешного несинхронного включения. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. Вип. 42. С. 56-60.

6. Втомне пошкодження валопроводу парової турбіни при несинхронному підключенні до мережі турбогенератора / А. П. Бовсуновський, В. П. Куєвда, Ю. В. Куєвда, Є. В. Штефан. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 4(72). С. 48-55.

7. Fatigue damage of turbine shafts of sugar plants at asynchronous connections of turbogenerator to the power network / V. Kuevda, A. Bovsunovsky, Iu. Kuievda, E. Shtefan. *The Second North and East European Congress on Food : book of abs.*, Kyiv, 26-29 May 2013. Kyiv, 2013. P. 60.

8. Балюта С. М., Куєвда Ю. В. Математична модель електромеханічних процесів у турбогенераторі для розрахунку крутильних коливань чотирьохмасового валопроводу. «*Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*» : матеріали 79 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 15-16 квітня 2013 р. Київ, 2013. Ч. 2. С. 372-373.

9. Сошин В., Куєвда Ю., Куєвда В. Методика розрахунку перехідних процесів у кріотурбогенераторах з урахуванням електромагнітних екранів на роторі. «*Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*» : матеріали 80 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 10-11 квітня 2014 р. Київ, 2014. Ч. 2. С. 351-352.

10. Використання асинхронної машини для заспокоєння крутильних коливань синхронного турбогенератора при його роботі на електричну мережу великої потужності / В. Островка, В. Куєвда, С. Балюта, Ю. Куєвда. «*Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*» : матеріали 81 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 23-24 квітня 2015 р. Київ, 2015. Ч. 2. С. 256.

11. Мала О., Куєвда Ю. Математична модель перехідних процесів у турбогенераторі за наявності асинхронного демпфуючого пристрою (АДП). «*Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*» : матеріали 82 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 13-14 квітня 2016 р. Київ, 2016. Ч. 2. С. 252.

12. Kuievda Iu., Baluta S., Kuevda V. An asynchronous damping device for decreasing shaft swings of powerful turbogenerators. *The 8th Central European Congress on Food : book of abs.*, Kyiv, 23-26 May 2016. Kyiv, 2016. P. 42.

13. Kuievda Iu. An overall algorithm for torsional fatigue estimation of shafts of large steam turbine-generators in a grid connected system. «*Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*» : матеріали 83 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 5-6 квітня 2017 р. Київ, 2017 р. Ч. 2. С. 228.

14. Балюта С. М., Куєвда В. П., Куєвда Ю. В. Використання багатомасових моделей валопроводів потужних турбоагрегатів при аналізі та синтезі системних стабілізаторів електричних систем. *«Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції»*: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 7-8 листопада 2017 р. Київ, 2017. С. 153-154.

15. Балюта С. М., Куєвда Ю. В. Методика аналізу робастної стійкості та якості системних стабілізаторів електричних систем з потужними турбогенераторами [Електронний ресурс]. *«Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»*: матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, м. Київ, 22 листопада 2017 р. Київ, 2017. С. 15. URL: <https://nuft.edu.ua/naukova-diyalnist/naukovi-konferencii>

16. Куєвда В., Куєвда Ю. Асинхронний демпфуючий пристрій для потужних турбогенераторів. *«Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті»*: матеріали 83 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 5-6 квітня 2017. Київ, 2017. Ч. 2 С. 229.

17. Куєвда Ю. В., Балюта С. М. Робастні системи взаємозв'язаного керування турбогенераторами в умовах невизначеності [Електронний ресурс]. *Оптимальне керування електроустановками*: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 11-12 жовтня 2017 р. Вінниця, 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey/schedConf/presentations>

18. Kuievda Yu., Baluta S. Interconnected robust power system stabilizer based on  $H_{\infty}$ -optimization with pole placement constraints. *«Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті»*: матеріали 84 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 23-24 квітня 2018 р. Київ, 2018. Ч. 2. С. 247.

19. Балюта С. М., Куєвда Ю. В. Синтез робастних систем взаємозв'язаного керування турбоагрегатами в умовах невизначеності. *«Автоматика-2018»*: матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління, м. Львів. 18-19 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 27-28.

20. Куєвда Ю. В., Балюта С. М. Автоматизована система управління турбоагрегатом з робастним взаємозв'язаним регулятором [Електронний ресурс]. *«Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»*: матеріали V Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, м. Київ, 22 листопада 2018 р. Київ, 2018. С. 60-61. URL: <https://nuft.edu.ua/naukova-diyalnist/naukovi-konferencii>

21. Визначення динамічних крутних моментів, що діють на ротор турбогенератора ТГВ-200 при трифазних коротких замиканнях / В. П. Куєвда, Є. В. Штефан, Ю. В. Куєвда, Д. А. Башта. *Енергетика та електрифікація*. 2011. № 8. С. 14-20.

22. Патент на корисну модель 113330 Україна, МПК (2006.01) H02K 16/00. Електромашинний агрегат / Ю. В. Куєвда, В. П. Куєвда; заявник Національний університет харчових технологій; № u201607340; заявл. 06.07.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2, 2017 р.

23. Патент на корисну модель 128167 Україна, МПК (2006.01) H02K 17/00. Електромашинний агрегат / Ю. В. Куєвда, В. П. Куєвда; заявник Національний університет харчових технологій; № u201802078; заявл. 28.02.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17, 2018 р.

### АНОТАЦІЯ

*Куєвда Ю.В.* Автоматизована система взаємозв'язаного робастного керування турбоагрегатом в умовах невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти та науки України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена питанням забезпечення довговічності та надійності роботи турбоагрегата шляхом створення автоматизованої системи робастного взаємозв'язаного керування турбоагрегатом з функцією контролю стану його валопроводу.

Розроблено процедури ідентифікації передавальної функції об'єкта керування, а також параметрів механічної системи турбоагрегата. Розвинуто методи синтезу взаємозв'язаного робастного регулятора турбоагрегата.

Запропоновано структуру автоматизованої системи робастного взаємозв'язаного керування турбоагрегатом. Розроблено метод зміни демпфувальних властивостей турбоагрегата за допомогою динамічного компенсатора крутильних коливань. Розвинуто методи моніторингу стану валопроводу турбоагрегата.

**Ключові слова:** автоматизована система, турбоагрегат, робастне керування, пошкоджуваність, генетичний алгоритм, ідентифікація, динамічний компенсатор крутильних коливань.

### АННОТАЦІЯ

*Куєвда Ю.В.* Автоматизированная система взаимосвязанного робастного управления турбоагрегатом в условиях неопределенности. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». – Национальный университет пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена вопросам обеспечения долговечности и надежности работы турбоагрегата путем создания автоматизированной системы робастного взаимосвязанного управления турбоагрегатом с функцией контроля состояния его валопровода.

Разработаны процедуры идентификации передаточной функции объекта управления, а также параметров механической системы турбоагрегата. Развита методика синтеза взаимосвязанного робастного регулятора турбоагрегата.

Предложена структура автоматизированной системы робастного взаимосвязанного управления турбоагрегатом. Разработан метод изменения демпфирующих свойств турбоагрегата с помощью динамического компенсатора крутильных колебаний. Развита методика мониторинга состояния валопровода турбоагрегата.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, турбоагрегат, робастное управление, повреждаемость, генетический алгоритм, идентификация, динамический компенсатор крутильных колебаний.

## SUMMARY

*Kuievda Iu.V.* Automated system of interconnected robust control of the turbine generator unit under uncertainty. – The Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.13.07 "Automation of control processes". – National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the issues of ensuring the durability and reliability of the turbine generator unit by creating an automated system of robust interconnected turbine generator unit control with the function of monitoring the material damage of its shaft. To solve the problems, the theory of automatic control, genetic algorithms of optimization, methods of synthesis of robust regulators, the theory of linear matrix inequalities, methods of simulation analysis are used.

As a result of the system analysis of the turbine generator unit, the features of the turbine generator unit as a control object are described. The system analysis of turbine generator unit control processes allowed to develop approaches to the construction of an automated turbine generator unit control system, which ensures the structuring and integrity of the control process, the coordination of the work of individual subsystems and functions implemented by the control system.

The mathematical models of the turbine generator unit are constructed, which provide the required accuracy and adequacy of the description of the control object for individual stages of the study. The initial model of the turbine generator unit is based on the physical principles of the work of its components and has the form of a system of ordinary nonlinear differential equations.

To study the influence of the control system on torsional oscillations of the shaft, a model of the turbine generator unit's shaft was used in the form of a multivariate oscillating rotating system. The number of masses and system parameters that provide sufficient modeling accuracy are determined by the developed identification procedure using conjugate gradient method and genetic algorithms.

For synthesis problems the model of the turbine generator unit is obtained by linearizing the complete model and reducing its order by the Schur's method. At robust interconnected regulators of the turbine unit, the  $H_\infty$ -theory uses the matrix transfer function of the control object in the form of the model with additive uncertainty. The procedure for identifying parameters of the control object transfer function, and their boundaries of uncertainty, is developed.

In order to provide work in conditions of uncertainty and obtaining its best damping characteristics, the synthesis of the interconnected robust regulator of the turbine generator unit is carried out in accordance with the  $H_\infty$ -theory with the simultaneous placement of the poles of the transfer function of the closed system in the region of the complex plane, which is described by linear matrix inequalities.

To provide robust control quality, it is proposed to modify the procedure of D-K iterations of  $\mu$ -synthesis of a robust controller by introducing restrictions on the poles of the transfer function of the closed system.

A computer model has been created using simulation modeling, which confirmed the effectiveness of the synthesized interconnected robust controllers for different operating modes of the turbine generator unit in the electric system. The simulation was carried out for various parameters of the model of the control object and its results demonstrated the robust properties of the regulators.

An automated system of interconnected robust control of turbine generator unit with a function of control of the state of its shaft is developed.

For implementation of the monitoring functions of the shaft line the methods of determining and evaluating the damage of the turbine generator unit's shaft are used. This value is an essential component of the turbo generator unit's residual lifetime. In order to limit the growth of damage, it is proposed to use a designed dynamic compensator for torsional oscillations – passive or active.

Structurally, the dynamic compensator is an asynchronous machine, which is planted on one of the shaft of the turbine generator unit, its outputs of the stator windings are connected to a separate three-phase network with constant values of voltage and frequency. In a passive version, the dynamic compensator is an uncontrolled asynchronous machine, in the active one, an asynchronous machine with vector control and a state controller, synthesized using the method of setting the eigenvalues of the closed loop control to provide damping properties.

The technical result of using the dynamic compensator is to significantly reduce the amplitude and duration of the low-frequency oscillations of the rotor of the synchronous turbogenerator, the time of perturbation in the electrical network, and torsional oscillations by the active version, that ensures a limitation of the accumulation of damage to the material of the shaft and to save the turbine generator unit's lifetime.

The efficiency of the dynamic compensator is confirmed by simulating the transient processes of the turbine unit on the simulation model.

A subsystem for monitoring the state of the material of the turbine generator unit's shaft is developed, one of the main tasks is to assess the residual material lifetime of the shaft through the real-time calculation of the parameter of damage to the shaft material according to the Palmgren-Miner's theory.

Calculated studies of the accumulation of damaged material of the shaft in abnormal operating modes are carried out, which will allow to estimate the residual material lifetime of the shaft according to the statistics of various types of abnormal processes in the power system.

Thus, the automated system of interconnected robust control of the turbine generator unit with the function with control of the state of its shaft line has been developed to ensure the durability and reliability of the turbine generator unit.

**Key words:** automated system, turbo generator unit, robust control, damage, genetic algorithm, identification, dynamic compensator of torsional oscillations.