

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Шевченко Валентина Володимирівна



УДК 621.313.322

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ПІДТРИМКИ  
КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ  
І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХНЬОЇ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ  
ПРИ ТРИВАЛІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор

**Мілих Володимир Іванович,**

Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,

завідувач кафедри електричних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Мазуренко Леонід Іванович,**

Інституту електродинаміки НАН України,

завідувач відділу електромеханічних систем;

доктор технічних наук, професор

**Василів Карл Миколайович,**

Національний університет «Львівська політехніка»,

професор кафедри електроенергетики та систем управління;

доктор технічних наук, професор

**Плюгін Владислав Євгенович,**

Харківський національний університет

міського господарства ім. О.М. Бекетова,

професор кафедри систем електропостачання

та електроспоживання міст

Захист відбудеться 15 січня 2021 р. в 14-00 годин на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Автореферат розісланий 23 жовтня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Олена ЮР'ЄВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Актуальність дослідження визначається особливостями сучасності: екологічні проблеми, зростання населення планети, підвищення його енергетичної активності, що потребує подальшого збільшення вироблення електроенергії. В загальній енергосистемі України появились нові джерела, які мають активну державну підтримку, в той час, як класична електроенергетика (теплові та атомні електростанції, (ТЕС та АЕС)) не отримує достатнього державного фінансування для проведення робіт по вдосконаленню та оновленню електрообладнання. Через загальносвітову (і відповідно, вітчизняну) економічну кризу оновлення встановленого обладнання і, в першу чергу турбогенераторів (ТГ), неможливе. Тому для підтвердження перспективності і необхідності виконання робіт з дослідження та вдосконалення ТГ, встановлення їхньої ролі в вітчизняній і світовій енергетиці, встановлення напрямків проведення робіт зі створення нових конкурентоспроможних ТГ і модернізації ТГ, які значний термін в експлуатації. З використанням теорії циклічного розвитку проведено прогнозування напрямків розвитку електроенергетики. Під час розробки рекомендацій щодо створення нових ТГ орієнтувались на світові стандарти і технологічні можливості електромашинобудівної і супутніх галузей. Основними завданнями роботи була розробка пропозицій щодо забезпечення підвищення надійності ТГ в питанні продовженні терміну їхньої експлуатації, вибір напрямків вдосконалення вітчизняних ТГ і розробка пропозицій по їх реалізації, забезпечення енергоефективності та науково-технічної конкурентоспроможності ТГ на світовому ринку. Для цього вибирались рішення, які повинні забезпечити стійку роботу ТГ під час роботи в різних режимах, дають змогу підвищити їхню енергоефективність шляхом вдосконалення якості виготовлення, монтажу, обслуговування та ремонтів. Під час вибору рішень щодо виготовлення та проведенні модернізації ТГ запропоноване використання нових технологій, матеріалів, розрахункових і конструкційних рішень.

Для визначення можливості підтримки науково-технічної конкурентоспроможності вітчизняних ТГ на світовому ринку встановлені напрямки, в яких зазначено відставання від світових фірм: необхідність підвищення потужності в одиниці виконання, зниження масогабаритних показників (першочергово, зниження питомої маси), забезпечення повноти діагностики стану ТГ і систем охолодження, вирішення питання переведення ТГ потужністю 200-300 МВт з водневого на повітряне охолодження. Актуальність проведення робіт з дослідження і вдосконалення ТГ підтверджується положеннями «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року», де вказано, що основним завданням забезпечення енергонезалежності країни є підвищення техніко-економічних характеристик ТЕС і АЕС, зокрема турбогенераторів.

З огляду на вищезгадане, актуальними науково-прикладними проблемами є:

– визначення найбільш ймовірного сценарію розвитку національної електроенергетики для підтвердження перспективності виконання робіт з дослідження ТГ; доведення того, що тепла електроенергетика ще довгий час в Україні й світі буде основною галуззю, яка буде забезпечувати споживачів електроенергією, і що ТГ ще довгий час будуть користуватися попитом і їх дослідження актуальне;

- виконання наукового обґрунтування та розробка пропозицій щодо вдосконалення конструкцій ТГ для забезпечення їхньої конкурентоспроможності, відповідності світовим стандартам; визначення вірогідних шляхів забезпечення ефективної роботи ТГ на мережу, що працює зі змінними параметрами за умовою тривалого часу експлуатації ТГ (більше встановленого в технічній документації заводу-виробника);

- розробка пропозицій щодо вдосконалення конструкцій ТГ, які тривалий час працюють на електростанціях, розробка пропозицій щодо їх модернізації з метою продовження терміну експлуатації; визначення особливостей їхньої роботи, проведення ремонтів і діагностики; визначення сучасних прийомів обслуговування, діагностики та проведення ремонтів ТГ, систем комплексного контролю стану ТГ; розробка пропозицій щодо застосування сучасних матеріалів і технологій виготовлення і модернізації. Забезпечення відповідності запропонованих рішень технологічним можливостям електромашинобудівної та супутніх галузей;

- дослідження проблем і розробка пропозицій щодо вдосконалення діагностики та ремонтів систем охолодження ТГ;

- оцінка стану і напрацювання пропозицій щодо вдосконалення системи професійної підготовки робітників ТЕС і АЕС, підтримки їхньої економічної зацікавленості для утримання в національній електроенергетиці.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р., з урахуванням особливостей розвитку сучасної електроенергетики і науково-дослідних робіт плану МОН України: «Розвиток теорії і методів проектування на основі чисельно-польових методів для вдосконалення існуючих і створення нових електричних машин», (ДР № 0111U002269); «Розробка науково-методичних основ вдосконалення турбогенераторів для підвищення їх технічного рівня і надійності в умовах електроенергетичних систем» (ДР № 0113U000433); «Розвиток теорії та науково-методичних основ для створення і модернізації турбогенераторів, що задовольняють сучасним вимогам електроенергетичної системи України», ДР № 0115U000528, в яких здобувачка була співвиконавцем; «Розвиток теорії та науково-методичних основ щодо удосконалення високовикористованих електричних машин» (ДР № 0116U000877), в який здобувачка була відповідальним виконавцем

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка технічних і технологічних заходів щодо підвищення енергоефективності нових ТГ і ТГ, які експлуатуються тривалий час, забезпечення їхньої ефективної роботи під час тривалої експлуатації з урахуванням особливостей роботи на сучасну енергосистему, підтримка науково-технічної конкурентоспроможності нових ТГ. Запропонувати напрямки вдосконалення нових ТГ для підтримки їх конкурентоспроможності і підвищення надійності ТГ, які тривалий час перебувають в експлуатації.

Для реалізації цієї мети слід було вирішити такі наукові задачі:

1. Провести аналіз і прогнозування напрямків розвитку теорії та практики турбогенераторобудування України з урахуванням світових тенденцій розвитку електроенергетики. З використанням теорії циклічного розвитку вибрати найбільш доцільний для України сценарій розвитку електроенергетики, згідно з яким встановити перспективні

напрямки створення нових та модернізації ТГ, що тривалий час в експлуатації. Вирішити питання розширення діапазону надійної експлуатації ТГ в різному технічному стані і під час роботи в неномінальних режимах шляхом вдосконалення виробництва і монтажу, підвищення якості обслуговування і ремонтів; використання нових конструкцій, технологій і матеріалів; створення комплексних програм діагностики. Забезпечити економічну доцільність нових технічних рішень.

2. Провести дослідження конструкцій ТГ з метою зниження їх масогабаритних показників для забезпечення конкурентоспроможності на світовому ринку. Встановити можливість і доцільність підвищення потужності ТГ в одиниці виконання; запропонувати напрямки зниження масогабаритних показників ТГ (першочергово питомої маси) за вимоги одночасного підвищення потужності без зміни габаритів, а для ТГ потужністю 200–300 МВт – з одночасною заміною водневої системи охолодження внутрішнього об'єму ТГ на повітряну. Виконати розрахунки модернізованих елементів і вузлів ТГ зі зниженими масогабаритними показниками.

3. Проаналізувати стан, проблеми та запропонувати напрямки вдосконалення систем охолодження ТГ. Розробити методику компонування теплообмінників ТГ з урахуванням типу охолоджувального агенту і величини втрат під час роботи ТГ в різних режимах. Систематизувати дефекти систем охолодження ТГ, запропонувати способи їх діагностики та усунення дефектів в станційних умовах.

4. Провести дослідження особливостей обслуговування, діагностики та проведення ремонтів ТГ, які тривалий час в експлуатації. Розробити пропозиції щодо продовження терміну їхньої подальшої роботи. Для цього встановити вплив швидкості зміни навантаження на деформацію стрижнів обмоток та на стан ізоляції і шихтованих осердь; визначити вплив старіння металів на надійність ТГ і довговічність їх експлуатації, запропонувати вимоги щодо вибору конструкції лобових частин обмоток статора; продовжити пошук причин руйнування осердь статорів ТГ, які тривалий час в експлуатації.

5. Для обмеження необхідної кількості додаткових каналів контролю стану ТГ в разі продовження терміну експлуатації з ціллю зниження психологічного навантаження на операторів енергоблоків визначити та запропонувати найбільш інформативний показник. Розглянути проблеми та запропонувати шляхи поліпшення професійної підготовки робітників ТЕС і АЕС, визначити напрямки підвищення їх економічної зацікавленості для утримання в національній електроенергетиці.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, механічні та теплові процеси в ТГ, енергоефективність ТГ при тривалій експлуатації, напрямки модернізації ТГ і охолоджувачів в разі підвищення потужності зі зниженням масогабаритних показників та заміни агенту охолодження.

Предмет дослідження – нові турбогенератори і ТГ, які тривалий час працюють на блоках ТЕС і АЕС, їхні електромагнітні, теплові та механічні характеристики, напрямки вдосконалення з урахуванням сучасних умов експлуатації, перспектив розвитку електроенергетики та орієнтації на світові стандарти щодо науково-технічної конкурентоспроможності.

Методи дослідження ґрунтувалися на наукових положеннях теорії електричних машин, теоретичних основ електротехніки, теорії теплообміну і опору матеріалів; використовувались лінійні диференціальні рівняння і чисельні методи (з використанням пакетів прикладних програм MathCAD-2000 Professional и SolidWorks, додаток SolidWorks Simulation). Для варіантного проектування конструкцій ТГ використовувались методи зниження ваги електричних машин Муценека К.Я. і зниження маси конструкцій Журавльова В.Н. Для оцінки габаритів ТГ використане геометричне моделювання, що дає змогу аналізувати різні ТГ за єдиним алгоритмом з урахуванням особливостей конструкції і дії змінних навантажень. Розрахунки, проведені в роботі, підтверджені експериментальними даними, зібраними під час виконання ремонтних робіт і сервісного обслуговування ТГ, що працюють на блоках теплових та атомних електростанцій.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше з використанням теорії циклічного розвитку (теорії «довгих хвиль» Кондратьєва М.Д.) доведено, що для України найбільш перспективний і можливий стабілізаційно-стагнаційний сценарій розвитку, за яким економіка, промисловість, соціальні програми залежать від стабільності та достатності забезпечення електроенергією, від надійності функціонування системи «електроенергетика» і, першочергово, ТГ. Дано обґрунтоване підтвердження перспективності досліджень ТГ, як основних джерел електроенергії в вітчизняній енергосистемі натеper і ще достатньо довго в майбутньому. Встановлено, що необхідність проведення робіт з вдосконалення ТГ підвищується з розвитком ринкових відносин в електроенергетиці.

2. Вперше встановлені та науково підтверджені перспективні напрямки створення сучасних ТГ, модернізації ТГ під час тривалої експлуатації, запропоновані рішення продовження терміну їх використання. Вперше складена структурно-логічна схема виконання робіт з підтримки науково-технічної конкурентоспроможності вітчизняних ТГ з урахуванням технічного рівня заводу-виробника та технічних можливостей супутніх галузей в напрямках зменшення питомої маси ТГ, заміни водневої системи охолодження на повітряну, збільшення потужності нових ТГ в одиниці виконання та потужності ТГ, що вже працюють на блоках електростанцій, без зміни габаритів.

3. Вперше доведена необхідність під час визначення черговості вмикання ТГ в енергосистему враховувати не тільки собівартість електроенергії, але й дані щодо їхнього стану, а також те, що підтримувати номінальні параметри енергосистеми України доцільно турбогенераторами потужністю 200–300 МВт, встановленими на ТЕС, і що використання для такого регулювання турбогенераторів АЕС неприпустимо. Зазначена необхідність дослідження установки на електростанціях, паралельно з синхронними турбогенераторами, асинхронізованих турбогенераторів з метою передачі їм функції підтримки номінальних параметрів енергосистеми.

4. Вперше виконано порівняння та показано наскільки і чому вітчизняні ТГ поступають за питомою масою турбогенераторам провідних світових фірм, чому вони важче зарубіжних аналогів. Запропоновано для зменшення цього показника використовувати максимально можливу уніфікацію елементів і вузлів ТГ, стандартні профілі, сучасні матеріали і технології виробництва. Зазначено, що під час виконання робіт зі

зменшення питомої маси окремих елементів ТГ, найбільш перспективним є геометричне моделювання з використанням можливостей сучасних комп'ютерних технологій і системного підходу. Запропоновано, як показник технічної досконалості виробництва ТГ, використовувати загальний коефіцієнт технологічної оснащеності (КТО) і часткові КТО з різних видів технологічної оснастки. Доведено, що значення КТО є показником, згідно з яким можливе порівняння технічного рівню вітчизняних підприємств турбогенераторобудування з підприємствами інших країн.

5. Вперше запропонована методика розрахунку показників динаміки приросту комплексного показника уніфікації, який підтверджує дієвість виконаних прийомів зі зниження питомої маси ТГ. Вперше для ТГ з повітряним охолодженням отримані середні значення показників динаміки приросту комплексного масового та об'ємного показника уніфікації, що підтвердило можливість зниження маси і габаритів ТГ в разі проведення запропонованій зміни компоновки неактивної зони ТГ.

6. Отримали подальший розвиток дослідження елементів неактивної зони ТГ (корпус, лапи, підвіски, внутрішній і зовнішній щити, натискні фланці, охолоджувачі, приставні короби); виконано порівняльний аналіз їхніх конструкцій, запропоновані кращі за масогабаритними параметрами варіанти. Вперше виконано порівняння масових показників корпусів ТГ з водневим і повітряним охолодженням, запропоновані зміни в конструкції неактивної зони ТГ при переході до повітряного охолодження. Підсумовані напрямки та складена схема проектування ТГ з повітряним охолодженням за вимоги зниження масогабаритних параметрів ТГ за чотирима основними напрямками: технічне, управлінське-кадрове, матеріально-постачальне та технологічне, – які слід враховувати під час зниженні масогабаритних показників ТГ. Запропонована методика механічного розрахунку елементів і вузлів ТГ, для яких плануються зміни для зниження питомої ваги. З використанням цієї методики проведено вибір раціональних форм стандартних профілів для елементів конструкції ТГ при складних навантаженнях. Запропоновано вважати критерієм допустимого зниження перерізів елементів конструкцій неактивної зони ТГ питомий момент опору при дії нормальної та дотичної напруги (при розрахунках використовувалась гіпотеза плоских перерізів Бернуллі і теорія природно закручених стрижнів Кірхгофа-Клебша). Запропоновано використовувати для навантажених елементів неактивної зони ТГ композиційні матеріали.

7. Вперше показана можливість підвищення потужності ТГ від 300 до 500 МВт без зміни габаритів; встановлено на скільки сумарні маса, вартість і втрати декількох ТГ більше маси, вартості та втрат одного ТГ тієї ж сумарної потужності (в  $\sqrt[4]{m}$ , де  $m$  – кількість ТГ меншої потужності).

8. Набуло подальший розвиток ствердження, що контроль вібрації є найбільш результативним показником стану ТГ, що дало підставу при переході до обслуговування по фактичному стану та у разі продовженні строку експлуатації ТГ скоротити кількість додаткових каналів діагностики. Запропоновано «старіння» і неоднорідність матеріалів, умови роботи і ступінь відповідальності деталей і вузлів, дію ударних навантажень враховувати введенням коефіцієнтів відхилення дійсних напружень від розрахункових.

9. Вперше, без створення фізичної моделі, за допомогою моделювання з використанням комп'ютерних програм (зокрема, програмного комплексу SolidWorks, додаток

SolidWorks Simulation) отримані дані теплового і механічного стану модернізованих елементів ТГ; проведено дослідження впливу швидкості зміни навантаження на ступінь деформації стрижнів обмоток і на стан ізоляції; встановлена допустима швидкість підвищення навантаження ТГ. Отримані значення перепаду температури по товщині ізоляції ТГ, визначено вплив цього перепаду на надійність ізоляції. Це дало підставу зробити висновок, що збільшення потужності ТГ з сучасними видами ізоляції шляхом підвищенням номінальної напруги більш ніж до 27 кВ безперспективно.

10. Отримали подальший розвиток дослідження щодо вдосконалення конструкції «кошику» лобових частин обмоток статора за умовою зниження вібрації, з урахуванням вимоги синхронізації частоти коливань окремих елементів «кошика» і стабілізації його властивостей під час тривалої експлуатації.

11. Вперше запропоновані методи розрахунку додаткових сил, що діють між листами шихтованого осердя статора ТГ. Зазначено, що ці додаткові сили можуть пояснити руйнування не тільки торцевих, а й центральних пакетів осердя. Вперше виконано дослідження впливу стану шихтованих осердь, схеми їхнього складання, рівня та якості опресування на експлуатаційну надійність і довговічність ТГ; запропонована методика обчислення відносного ковзання листів, оцінка впливу зносостійкості лакового покриття на термін експлуатації ТГ.

12. Вперше розроблена програма проведення діагностики та ремонту газоохолоджувачів на блоках ТЕС; запропонована методика розрахунку розподілу температури по теплообмінній поверхні трубок охолоджувача та інтенсивності тепловідведення залежно від кількості трубок, їхнього виду, компоновання та кількості ходів.

13. Отримали подальший розвиток дослідження впливу людського фактору на надійність роботи ТГ. Вперше для зменшення навантаження на операторів, які обслуговують ТГ, що тривалий час в експлуатації і потребують додаткового контролю, особливо за умовою переходу до виконання ремонтів по реальному стану, запропоновано додатково встановлювати тільки найбільш інформативні датчики – датчики вібрації. Доведена необхідність розширення програми професійної підготовки та перепідготовки персоналу станцій, ведення роботи з підвищення їхнього професіоналізму і матеріальної зацікавленості. Вперше показано, що до причин відставання від зарубіжних фірм, крім застарілих технологій на підприємствах, слід віднести відсутність фінансування досліджень нової техніки та підтримки наукових проектів, низький рівень фінансування та професійної направленості освітніх програм.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Дано обґрунтоване підтвердження перспективності дослідження ТГ, як основних джерел електроенергії натеper і достатньо довго в майбутньому, що може бути використано в разі звернення за державною підтримкою підприємств, що зв'язані зі створенням ТГ та супутнього обладнання. Доведена можливість заміни водневої системи охолодження ТГ на повітряну; необхідність і можливість збільшення одиничної потужності ТГ, зниження масових показників для підтримки конкурентоспроможності ТГ.

2. Запропоновані показники щодо вибору черговості вмикання ТГ в мережу. Доведено, що для регулювання параметрів енергосистеми слід використовувати ТГ, що

встановлені на ТЕС, і що використання ТГ блоків АЕС для регулювання параметрів електромережі неприпустимо. Показана перспективність використання асинхронізованих ТГ для регулювання балансу активної та реактивної потужностей в мережі, що допоможе зняти задачу регулювання коефіцієнту потужності мережі ( $\cos\phi$ ) з синхронних ТГ і підвищити їхню надійність.

3. Запропоновано використовувати загальний коефіцієнт технологічної оснащеності як критерій визначення технічного рівня заводу-виробника, представляти виготовлення ТГ, як умовно-дрібносерійне, і проводити розрахунки для такого типу виробництва. Запропоновані додаткові коефіцієнти, що дозволяють враховувати вплив старіння металів і зміни навантаження на стан ТГ.

4. Встановлені особливості роботи і обслуговування ТГ, які тривалий час перебували в експлуатації, для них запропоновано забезпечувати постійний контроль вібрації як найбільш інформаційний показник стану. В разі обслуговування і проведення планових ремонтів запропоновано розширювати перелік дефектів, які підлягають обов'язковій перевірці; в процесі експлуатації запропоноване вводити обмеження швидкості наростання навантаження, особливе для ТГ з безпосереднім охолодженням обмоток статора. Доведено, що в ТГ найвищу температуру в разі несиметричного навантаження мають торцеві зони ротора і клини, і що їх температуру слід вважати критерієм для визначення допустимої тривалості роботи з перевантаженням.

5. Під час проектування та модернізації ТГ з підвищенням потужності та зі збереженням габаритних розмірів запропоновано використовувати стандартні профілі, нові матеріали та технології виготовлення. Запропонована методика розрахунку механічної надійності цих профілів і оцінки економічності різних варіантів конструкцій. Запропоновані зміни конструкцій ТГ потужністю 200–300 МВт у разі переходу до повітряного охолодження.

6. Встановлено, що подальше підвищення потужності ТГ шляхом збільшення напруги більше 27 кВ, в разі використання сучасних ізоляційних матеріалів, безперспективно, і що підвищувати потужність ТГ слід за допомогою втілення нових матеріалів та технологій виготовлення.

7. Запропоновані положення щодо аргументації необхідності збільшення державного фінансування зі створення вітчизняних конкурентоспроможних ТГ. Встановлена роль людського фактору в забезпеченні надійності експлуатації ТГ, необхідність вдосконалення професійної підготовки персоналу станцій; вказана необхідність підвищення їх матеріальної зацікавленості для утримання в вітчизняній енергетиці.

8. Результати роботи впроваджені на ДП «Завод «Електроважмаш» (Харків); на Запорізькій та Хмельницькій АЕС; на Зміївський ТЕС; на Харківський ТЕЦ-5. Дослідження, проведені в роботі, використовуються під час розробки навчальних програм підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» на кафедрі електричних машин НТУ «ХП» та на кафедрі електричних машин і апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, в інших установах вищої освіти: в Національному університеті цивільного захисту України під час підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 053 – «Психологія» (спеціалізація «Робота з персоналом») та під час підвищенні про-

фесійної кваліфікації та перепідготовки персоналу станцій в питаннях зменшення їх психологічного навантаження в Регіональному інституті проблем громадянської охорони здоров'я.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачці належить провідна роль:

- у встановленні напрямів перспективного розвитку електроенергетики для підтвердження необхідності і перспективності виконання робіт щодо вдосконалення ТГ, у визначенні напрямків проведення модернізації ТГ, в питаннях підтримки їхньої конкурентоспроможності;

- в формулюванні завдань, в розробці методів дослідження ТГ і математичних моделей, у виконанні розрахунків теплового, вібраційного та механічного стану ТГ, зокрема шихтованих осердь, ізоляції і провідників ТГ з безпосереднім охолодженням;

- у встановленні особливостей роботи, діагностики, ремонтів та модернізації ТГ, які тривалий час в експлуатації; в розробці рекомендацій з підготовки та перепідготовки фахівців для обслуговування таких ТГ на блоках ТЕС і АЕС;

- в проведенні аналізу даних, отриманих під час обслуговування ТГ і з різних інформаційних джерел; в формулюванні висновків і розробці рекомендацій з практичного втілення отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи були представлені на 58 Міжнародних конференціях і Міжнародних симпозіумах:

- 1) «ІНТЕРСЕД–Україна» (Дніпропетровськ, 2007); 2) «Електромеханічні і енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (МНТК "ЕСМО'2013,2014", КНУ ім. М. Остроградського, м. Кременчук); 3) «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2008, 2019); 4) «Якість технологій – якість життя», (м. Судак, 2010); 5) «Застосування інноваційних технологій в наукових дослідженнях», (м. Курськ, 2011); 6) «Сучасні проблеми ступеневої освіти» (м. Ростов-на-Дону, 2011); 7) «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика», (Харків, «SIEMA–2011-2019»); 8) «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, MicroCAD-2012–2019); 9) Міжнародні науково-практичні конференції аспірантів (Харків, 2016-2019); 10) «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах», (м. Севастополь, 2013); 11) «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2013, 2014); 12) «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2013, 2014); 13) «Управління режимами роботи об'єктів електричних і електромеханічних систем» (м. Донецьк, 2013); 14) «Сучасні тенденції ТОiP. Діагностика обладнання гірничо-металургійного та енергетичного комплексів» (м. Маріуполь, 2013); 15) «Інноваційні технології в електроенергетиці і електротехніці» (м. Курськ, 2013, 2014); 16) «Електроенергетика та електромеханіка» (м. Воронеж, 2014, 2015); 17) «Електротехнічні та комп'ютерні системи: Теорія і практика (ЕЛТЕКС–2016)» (м. Одеса, 2016); 18) "Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування, (теорія, практика, історія, освіта)" (м. Київ, 2016); 19) "Енергетичні та теплоенергетичні процеси і обладнання" (м. Харків, 2017);

20) «Economy, science, education and synergy» (Bratislava, Slovakia, 2016); 21) Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017), (Kremenchug, 2017); 22) «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі» (м. Переяслав-Хмельницький, 2018); 23) «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (м. Київ, 2018, 2019); 24) «Сучасний рух науки» (м. Дніпро, 2018-2020); 25) «Новітні технології в освіті, науці і виробництві» (м. Покровськ, 2019, 2020); 26) «Innovative Technologies in Science and Education. European Experience» (Netherlands, Amsterdam, 2019); 27) «Science and Society» (Canada, Hamilton, 2019); 28) "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України" (м. Харків, 2019); 29) «Медицина наука та практика в умовах сучасних трансформаційних процесів» (м. Львів, 2020).

Також положення і результати роботи були представлені на 18 регіональних, міжвузівських конференціях і конференціях наукових Рад України.

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 115 наукових праць. У тому числі 4 монографії (3 – у співавторстві), 88 статей в профільних наукових журналах (2 – в журналах, які мають індексацію в базі Scopus, 4 – в базі Web of Science, 79 – в фахових і закордонних журналах, 3 – в Міжнародних промислових журналах), в 1 авторському свідоцтві та в 5 патентах України, 17 – в матеріалах міжнародних конференцій,

**Структура дисертації.** Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку з 317 джерел інформації. Дисертація містить 409 сторінок і включає 282 сторінок основного тексту, 163 ілюстрації, 75 таблиць, список літературних джерел на 34 сторінках і додатки на 55 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і завдання роботи, визначено проблеми та питання, що підлягають вирішенню; визначена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів; відображений особистий внесок здобувачки, представлена інформація про публікації результатів роботи.

**В першому розділі** наведено аналіз сучасного стану і запропоновано напрямки вдосконалення турбогенераторів з урахуванням світових і вітчизняних тенденцій розвитку електроенергетики, доказана необхідність проведення робіт з вдосконалення ТГ теплових електростанцій (ТЕС і АЕС), які є основними джерелами електроенергії на тепер і залишаться основними досить довго в майбутньому на тлі державної підтримки фактично тільки поновлюваних джерел енергії.

Проаналізовано результати досліджень вітчизняних та закордонних вчених в напрямках, які знайшли відображення в роботі. Показано, що сьогодення характеризується безперервними змінами економічних, соціальних, політичних подій, що відбивається і на функціонуванні електроенергетики: за останні 60 років значно збільшилося населення планети (практично в 1,9 раз, від 4 до 7,7 млрд.), на 30 % збільшилось питоме енергоспоживання країн зі значною кількістю населення (Китай, Індія), більше ніж в

5 разів виросло загальносвітове споживання і, відповідно, вироблення електроенергії. Підвищення енергетичної активності населення призвело до погіршення екологічного становища, підсилення дії руйнівних природних явищ (смерчі, цунамі, пожежі, землетруси). Підвищення енергоспоживання має стійку тенденцію, тому електроенергетика потребує хоча б приблизного прогнозування і додаткових досліджень щодо подальшого розвитку. У роботі під час визначенні напрямків розвитку електроенергетики враховувалися її циклічність, системність, рівень розвитку вітчизняного електромашинобудування та супутніх галузей. Розуміння циклічності використовується під час визначення напрямків розвитку техніки, робить більш обґрунтованими і раціональними цільові вкладення, дає можливість оцінювати економічність і окупність інвестицій. Проведено аналіз можливих сценаріїв розвитку електроенергетики, зроблено висновок, що найбільш вірогідним і перспективним для України є стабілізаційно-стагнаційний сценарій, згідно з яким перспективно продовжувати розвиток теплової енергетики і можна стверджувати, що протягом достатньо довгого часу базовими залишаться теплові та атомні електростанції і, відповідно, будуть потрібні ТГ. Теоретичною базою прогнозування розвитку електроенергетики була обрана теорія «довгих хвиль» Кондратьєва М.Д.– теорія циклічного розвитку, використання якої уможлиблює визначення найбільш ймовірних напрямків розвитку електроенергетики, знижує помилковість прогнозування, забезпечує готовність техніки до змін з урахуванням кризових явищ і яка є базовою при виконанні всіх економічних і технічних прогнозів у світі починаючи з середини 20 сторіччя.

Вказано, що в енергосистемі України актуальна проблема підтримки номінальних значень амплітуди і частоти напруги, є необхідність регулювання балансу активної та реактивної потужності в мережі. Зроблено висновок, що регулювання параметрів енергосистеми можливо тільки за допомогою турбогенераторів ТЕС, через що їх періодично переводять в неномінальні режими (режими розвантаження до 30, 50 і 70% від номінальної потужності та робота в режимі недозбудження). Однак серійні ТГ, встановлені на ТЕС, не розраховані на роботу в таких режимах, тому запропоновано на блоках ТЕС (паралельно з синхронними ТГ) встановлювати асинхронізовані ТГ, що уможлиблює зняття з синхронних ТГ функції регулювання балансу потужності в мережі та дозволяє підвищити їхню надійність. Вказано, чому і як під час вибору напрямків вдосконалення ТГ слід враховувати можливості супутніх з електромашинобудуванням галузей та економічні показники. Запропоновано згідно зі світовою тенденцією виводити в ремонт ТГ за їхнім реальним станом, а не за графіком планово-попереджувальних ремонтів. Встановлені напрямки подальшого вдосконалення ТГ, як для підвищення надійності їхньої роботи на блоках електростанцій в умовах тривалої експлуатації, так і для підтримки конкурентоспроможності нових машин. Визначені напрямки турбогенераторобудування в яких відзначено відставання від світових фірм, складена схема проведення робіт з підтримки конкурентоспроможності вітчизняних ТГ.

Розглянуті проблеми, пов'язані з людським фактором, визначені напрямки їхнього вирішення шляхом вдосконалення системи освіти, підготовки та перепідготовки персоналу станцій. Вказано, що через значний термін експлуатації електрообладнання

станцій особливо необхідне вміння операторів блоків ТЕС і АЕС адекватно реагувати на аварійні ситуації, мати сформовані професійні пріоритети.

Показано, що через необхідність використовувати електрообладнання, яке тривалий час в експлуатації, і в разі неформальної відмови від планово-попереджувальних ремонтів, необхідне посилювати контроль стану ТГ, проводити контроль в режимі *on-line*, що потребує збільшення кількості каналів контролю. Але значне збільшення неприпустимо через надмірне психологічне навантаження на людину-оператора і їх кількість слід обмежувати. Запропоновано значення вібрації вважати найбільш інформативним показником стану ТГ, і обмежити кількість додаткових каналів контролю стану ТГ додатковим встановленням тільки вібродатчиків.

**У другому розділі** розглянуті питання створення нових ТГ та модернізації ТГ на блоках станцій з одночасною вимогою підвищення потужності ТГ, зниження питомої маси конструкцій, збереження габаритів для забезпечення можливості використання фундаментів та систем забезпечення подачі водню, води і оливи, а для ТГ потужністю 200–300 МВт ще з одночасною заміною агенту охолодження (водню на повітря), що є природним кроком розвитку систему охолодження турбогенераторів згідно з теорією циклічності розвитку енергетики і промисловості.

На міжнародних тендерних торгах значення питомої маси ТГ є важливим показником; вважається, що вона характеризує технологічну досконалість підприємства-виробника ТГ, достатність використання сучасних технологій і матеріалів. Розглянуті сучасні методи оцінки параметрів електромашинобудівних конструкцій, вказано, що під час проектуванні нових ТГ слід орієнтуватися на світові аналоги з одночасним врахуванням технологічних можливостей вітчизняного виробництва. Для забезпечення одночасного з мінімізацією масогабаритних показників підвищення потужності в одиниці виконання запропоновано використовувати системний підхід, який максимально спрощує розрахунки і знижує ймовірність помилок.

Для ТГ зі зниженими масою і габаритами визначені допустимі межі зміни параметрів конструкцій, обрані напрямки вдосконалення технологій виготовлення ТГ з урахуванням особливостей режимів їхньої майбутньої роботи на станціях; розроблено алгоритми механічних розрахунків елементів, які підлягають зміні. За цими алгоритмами були проведені механічні розрахунки мінімізованих перерізів внутрішнього і зовнішнього щитів ТГ, корпусу статора ТГ з повітряним охолодженням і приставних коробів, проведено порівняння конструкцій підшипникових вузлів, запропоновані засоби проведення їх вибору в залежності від потужності і системи охолодження генератора.

Проведено порівняння мас ТГ з різними системами охолодження і встановлено, що вітчизняні ТГ поступаються практично всім фірмам світу (*Siemens*, «*ABB Alstom Power*», *Hitachi*, *General Electric*, *Westinghouse*), що найбільше відставання визначено в значеннях питомої маси неактивної зони ТГ. Запропоновано для зниження масових показників ТГ використовувати уніфікацію складальних вузлів і стандартні профілі, а також запропоновано пристрої, які використовуються тільки під час монтажу та транспортування, виконувати знімними і не враховувати їхню масу під час розрахунку питомої маси ТГ (кг/кВт), як це роблять закордонні фірми. Всі пропозиції щодо зміни в конструкціях оцінювалися за умовою відповідності технічним вимогам до ТГ заводу-

виробника та економічності їх виготовлення; складена структурно-логічна схема процесу проектування ТГ зі зниженими масогабаритними показниками.

Визначено, що рівень технологічної оснащеності виробництва визначає можливість випуску ТГ на світовому рівні. Для цього запропоновано розраховувати загальний коефіцієнт технологічної оснащеності, а також часткові коефіцієнти технологічної оснащеності за різними видами технологічної оснастки, порівнювати декілька варіантів технологічних процесів, зіставляти витрати та вибирати найбільш економічний варіант. Запропоновано методику розрахунку загального коефіцієнта технологічної оснащеності виготовлення турбогенератора, який характеризує технологічну досконалість процесу його виготовлення

$$K_{tool}^f = \frac{\sum K_{main}}{N_{oper}} + \sum K_{gro},$$

де  $\sum K_{main}$  – сумарна кількість найменувань технологічної оснастки;  $N_{oper}$  – кількість операцій, які виконують за допомогою цієї оснастки;  $\sum K_{gro}$  – сумарний розрахунковий коефіцієнт технологічної оснащеності групової обробки

$$\sum K_{gro} = \frac{\sum K_{mains}}{K_1 \cdot N_1 + K_2 \cdot N_2 + \dots + K_n \cdot N_n},$$

$\sum K_{mains}$  – сумарна кількість найменувань спеціальної оснастки, яку використовують при груповій обробці деталей;  $n$  – кількість найменувань цієї оснастки;  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – кількість деталей, які обробляють за допомогою  $n$ -ої оснастки;  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – кількість операцій, які виконують за допомогою спеціальної оснастки для кожної групи деталей.

Визначено, що на зниження ваги ТГ впливає не тільки технологія виготовлення, вибір профілів і матеріалів деталей, але й знання допустимих деформацій від різних видів напруг. Проведено розрахунок механічної надійності запропонованих профілів при різних видах навантаження. Під час розрахунків профілі опорних елементів ТГ приводились до простих форм (балок) (використовувалася гіпотеза плоских перерізів Бернуллі). Запропоновано засіб встановлення межі зменшення перерізів конструкційних елементів за даними механічних навантажень у разі зниження питомої маси ТГ. Запропоновано для зниження маси ТГ використовувати стандартні тонкостінні замкнуті профілі, широкополі двотаври та інші стандартні профілі. Також запропоновано в конструкціях сучасних ТГ використовувати нові композиційні матеріали, які за питомою міцністю перевершують сталі в 2–8 разів, а за модулем пружності – в 5–6 разів. Запропоновано коефіцієнт використання металу під час оцінки матеріалоемності елементів ТГ розраховувати за методом конструктивної технологічної поелементної обробки, коли кожен вузол умовно ділиться на окремі елементи. Запропоновано старіння матеріалів і вплив зміни навантаження враховувати введенням коефіцієнтів, які враховують відхилення дійсних напружень від розрахункових, неоднорідність матеріалів, умови роботи, вплив старіння матеріалів, ступінь відповідальності деталей.

Розглянута можливість збільшення потужності ТГ без зміни габаритів, що необхідно для збереження допоміжного обладнання і фундаментів на блоках станцій. Показано, що в ТГ відсутній лінійний зв'язок між потужністю та вагою: площа пазів зміню-

ється пропорційно діаметру осердя статора  $D_s$  в другий степені, а потужність – пропорційна  $D_s$  в третій степені, тому в ТГ потужністю 30 МВт питома вага матеріалів дорівнювала 2,75 кг/кВт, а при потужності 1000 МВт вона знизилась до 0,54 кг/кВт. Запропоновано для нових конструкцій визначати питому матеріаломісткість  $K_G$ , значення якої не повинно перевищувати  $K_G$  машин, що вже працюють на станціях.

Під час порівняння  $K_G$  базових і нових ТГ враховується, що потужність  $P_{sN}$

$$P_{sN} \sim j \cdot S_0 \cdot B_{mid} \cdot S_{mid} \cdot n_s = j \cdot q_{eff} \cdot w_s \cdot B_{mid} \cdot S_{mid} \cdot n_s,$$

де  $j$  – густина струму, А/мм<sup>2</sup>;  $q_{eff}$  – площа ефективного перерізу провідника, мм<sup>2</sup>;  $B_{mid}$  – середнє значення магнітної індукції в перерізі певної ділянки магнітопроводу  $S_{mid}$ , Тл;  $w_s$  – кількість витків обмотки статора;  $S_0 = q_{eff} \cdot w_s$ , мм<sup>2</sup> – загальна площа поперечного перерізу всіх витків обмотки. Тоді:

$$S_{mid} \cdot S_0 \sim l_s^2 \cdot l_s^2 = l_s^4, \quad P_{sN} \sim j \cdot B_{mid} \cdot n_s \cdot l_s^4.$$

Питомі значення маси та втрат, віднесені до потужності ТГ, дорівнюють:

$$G / P_{sN} \sim \sum P_i / P_{sN} \sim \sqrt[4]{P_{sN}^3 / P_{sN}} = 1 / \sqrt[4]{P_{sN}}.$$

Отримані закономірності визначають зв'язок маси та втрат, і можуть бути використані для наближених розрахунків, наприклад, під час встановлення зв'язку розмірів і маси машини:  $l_s^3 \sim G \sim (P_{sN} / n_{sN})^{0,75}$ . А зіставлення сумарної маси  $G_{\Sigma m}$  і сумарних втрат  $\Sigma P_m$   $m$  однакових машин до маси  $G$  і втрат потужності  $P_1$  однієї машини, номінальна потужність якої  $P_{sN}$  дорівнює сумі номінальних потужностей цих  $m$  машин ( $P_{sNm} = P_{sN}/m$ ), можна записати:

$$\frac{G_{\Sigma m}}{G} \approx \frac{\Sigma P_m}{P_1} \approx \frac{m \cdot \sqrt[4]{P_{sN}^3 / m^3}}{\sqrt[4]{P_{sN}^3}} = \frac{m}{\sqrt[4]{m^3}} = \sqrt[4]{m}.$$

Тобто сумарні маса і втрати декількох ТГ завжди більше від маси і втрат одного ТГ тієї ж сумарної потужності. Тому доцільно вибирати ТГ більшої потужності, у якого вартість, маса і втрати зменшуються приблизно в  $\sqrt[4]{m}$ .

Запропоновано алгоритм розрахунку механічної надійності окремих вузлів і елементів ТГ з повітряним охолодженням, для яких втілено конструкційні зміни. Виконано розрахунок мінімального перерізу внутрішнього щита ТГ та інших механічно напружених елементів ТГ від дії складних навантажень шляхом порівняння їх значень з межами міцності і жорсткості. Отримана залежність питомої ваги ТГ від зміни навантаження, тобто від зміни потужності ТГ. Встановлена рекомендована величина повітряного проміжку  $\delta_{opt}$  для ТГ зі зменшеними масогабаритними показниками, мм

$$\delta_{opt} \approx \frac{0,36 \cdot A_s \cdot \tau \cdot 10^{-4}}{k' \cdot B_\delta \cdot (x_d - x_s)},$$

де коефіцієнт  $k' = 0,92$ ;  $x_d = x_{ad} + x_s$  – синхронний індуктивний опір по поздовжній осі, Ом;  $x_s = 0,05 - 0,015$  – індуктивний опір розсіювання, Ом;  $A_s$  – лінійне навантаження, А/м;  $B_\delta$  – індукція в повітряному проміжку, Тл;  $\tau$  – полюсний поділ, м.

Встановлено зв'язок між видом холодоагенту і масогабаритними показниками ТГ. Для елементів неактивної зони ТГ (корпус, підшипникові вузли, зовнішні щити; попе-

речні стінки і ребра, що кріплять осердя статора) виконано порівняльний аналіз масогабаритних показників, запропонований кращий варіант, для якого виконані механічні розрахунки.

Під час розрахунків ваги і габаритів використовували питомі (віднесені до потужності) показники, що уможливило порівняння різних ТГ. За методом середніх коефіцієнтів були розраховані питома маса корпусу статора ТГ (кг/кВт); запропоновано критерій порівняння мас базового і пропонованого корпусу  $M_{\Delta}$ , (%) і показник ефективності використання його об'єму  $V_{\Delta}$ , (м<sup>3</sup>/кВт):

$$M_{\Delta} = \left[ 1 - \frac{P_{sN} \cdot (M'_C - G'_C)}{P'_{sN} \cdot (M_C - G_C)} \right] \cdot 100\% \quad \text{і} \quad V_{\Delta} = \frac{\left[ \pi \cdot \left( \frac{D_{out}}{2} \right)^2 \cdot l_{hous} \right] + 0,7 \cdot [l_{hous} \cdot h \cdot k]}{P_{sN}},$$

де  $D_{out}$  і  $l_{hous}$  – зовнішній діаметр і довжина корпусу статора, м;  $h$  – висота осі обертання ТГ, м;  $k$  – ширина фундаментної плити, м;  $M_C$  і  $M'_C$  – питома матеріаломісткість корпусу ТГ до і після проведення робіт щодо зниження масогабаритних показників;  $G_C$  і  $G'_C$  – маса корпусу до і після проведення таких робіт.

Виконано порівняння питомих масогабаритних параметрів корпусу статора  $g_{\Delta}$ ,  $V_{\Delta}$ ,  $M_{\Delta}$  (на прикладі турбогенератора серії ТГВ з одночасним збільшенням потужності від 120 до 200 МВт). Аналогічні показники для конструкцій з запропонованою модернізацією були розраховані для натискних фланців, стяжних призм корпусу, приставних коробів «повітряного» ТГ. Запропоновано способи зниження масогабаритних показників цих елементів і виконано розрахунки для ТГ з одночасним збільшенням їх потужності на 40 % (від 120 до 200 МВт). Показано, що в разі цього масу корпусу ТГ можна зменшити на 12 %. Співвідношення мас елементів неактивної частини базової («водневої») та запропонованої («повітряної») конструкції ТГ (у відсотках) наведені на рис. 1.

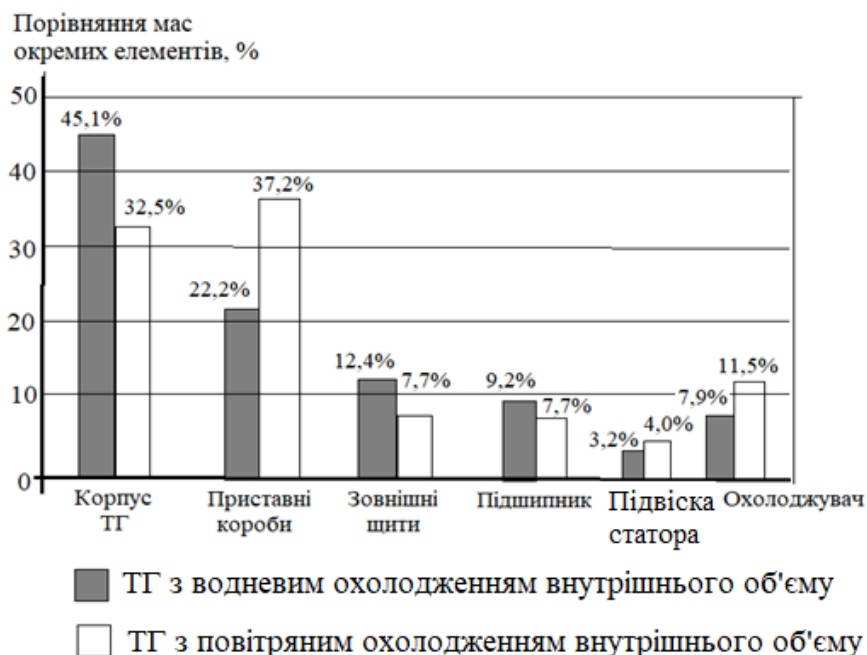


Рисунок 1 – Співвідношення мас окремих елементів неактивної частини ТГ

Для підтвердження, що для прийнятої конструкції ТГ використані всі можливості щодо зниження питомої маси, запропоновано використовувати коефіцієнти ефективності використання маси та об'єму неактивних елементів ТГ.

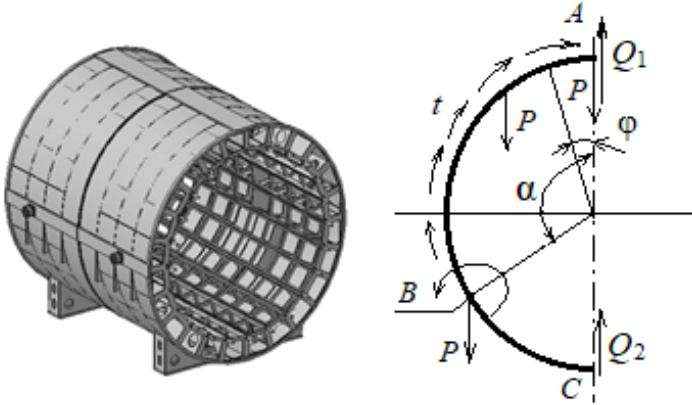


Рисунок 2 – Внутрішній корпус двокорпусної конструкції статора ТГ та розподіл навантаження від дії власної ваги корпусу статора на консольних опорах вразі дії згинального моменту

Виконано механічний розрахунок навантаженого корпусу ТГ зі зниженими масогабаритними показниками (рис. 2). За теоремою Кастільяно встановлена зміна діаметра корпусу статора («кільця») по вертикальній осі, мм:

$$\Delta d = \frac{G \cdot R^3}{2\pi \cdot E \cdot I_Y} \cdot C_3,$$

де  $I_Y$  – момент інерції перерізу відносно центральної осі  $O_Y$ , м<sup>4</sup>:

Згідно наведеному алгоритму розрахунків можливо визначати механічні напруги в корпусі ТГ при різному рівні розміщенні опорних поверхонь і вибирати розміщення опорних площ (рівень встановлення лап ТГ) із забезпеченням мінімальних навантажень.

Встановлено, що найбільший згинальний момент  $M_C = 0,75 \cdot G \cdot R$ , який діє на корпус статора, буде коли він спирається нижньою т. С об фундаментну плиту (рис. 2), тобто таке встановлення неприпустиме.

Виконано розрахунок механічних напруг в різних елементах ТГ при дії вигину зі зсувом і розтягуванням. Встановлено, що коефіцієнт запасу в разі дії граничних навантажень буде залежати від того, за яким законом змінюються діючі навантаження (момент  $M$  і тангенціальна сила  $Q$ ). Визначено коефіцієнти запасу в разі дії навантажень різного виду  $k_{pr}$

Виконано розрахунок механічних напруг в різних елементах ТГ при дії вигину зі зсувом і розтягуванням. Встановлено, що коефіцієнт запасу в разі дії граничних навантажень буде залежати від того, за яким законом змінюються діючі навантаження (момент  $M$  і тангенціальна сила  $Q$ ). Визначено коефіцієнти запасу в разі дії навантажень різного виду  $k_{pr}$

$$k_{pr} = \frac{k_p}{2k_m} \cdot \left( \sqrt{k_p^2 + 4k_m^2} - k_p \right)$$

де  $k_m$  – коефіцієнт запасу в разі дії тільки згинального моменту  $M$ ,  $k_m = M_0/M$ ;

$k_q$  – коефіцієнт запасу в разі дії тільки тангенціальної сили  $Q$ ,  $k_q = Q_0/Q$ .

Знання коефіцієнтів запасу в разі дії навантажень різного типу дозволить прогнозувати надійність роботи ТГ в різних умовах експлуатації. Проведено порівняння напрямів зниження собівартості пропонованих рішень, що використовувались для зниження масогабаритних показників ТГ.

**В третьому розділі** розглянуті проблеми та напрямки вдосконалення систем охолодження сучасних ТГ. Зазначено, що історія розвитку турбогенераторобудування фактично є історією інтенсифікації охолодження ТГ. Розглянута інтенсифікація систем охолодження від перших вітчизняних серій ТГ (1924 р.) до теперішнього часу, під час оцінки яких враховувалися економічні показники і особливості стану ТГ, які тривалий

час в експлуатації. Проведено дослідження теплового стану елементів конструкції ТГ потужністю 200–300 МВт і розглянута можливість переходу на повітряне охолодження, запропоновані заходи щодо забезпечення більш рівномірного розподілу температури в об'ємі машини і зниження механічних втрат.

Для цього запропоновано:

1) застосовувати для роторів безпосереднє охолодження зі триструменевим розподілом потоків повітря, використовувати пайку з високочастотним індукційним нагріванням; вводити в паз статора пружний шар для забезпечення осьового теплового розширення обмотки; застосовувати вбудовані відцентрові вентилятори з прямими апаратами, використовувати напірні можливості ротора, що обертається;

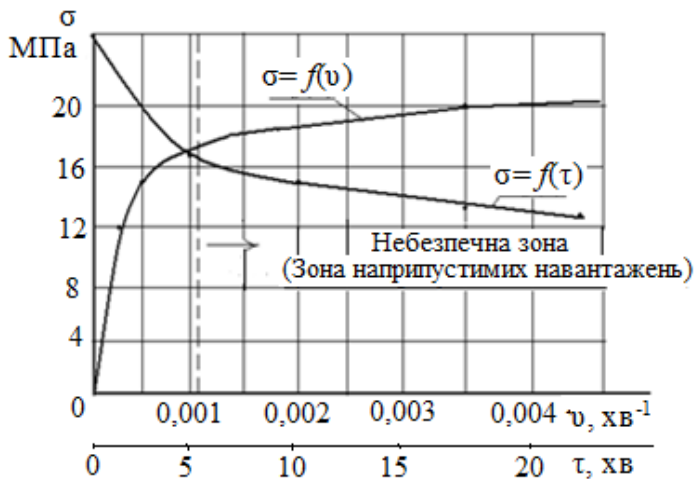


Рисунок 3 – Механічні напруги в ізоляції залежно від тривалості дії розтягувальних зусиль ( $\tau$ , хв) і швидкості деформації (розтягування), ( $\nu$ , хв<sup>-1</sup>)

2) використовувати для обмоток роторів легуючі домішки (срібло) для підвищення міцності чистої міді, виключення залишкової деформації провідників і пошкодження ізоляції, тому що навіть в стаціонарних режимах в міді обмоток виникають напруги, близькі до межі міцності рис. 3;

3) в ТГ для підвищення надійності застосовувати пружне кріплення осердя в корпусі; для ТГ з повітряним охолодженням також застосовувати роз'ємний статор для спрощення виготовлення, транспортування і проведення ремонтів;

4) для поліпшення охолодження та підвищення надійності ТГ зменшувати товщину крайніх пакетів осердь в середньому на 25 % (до 25-30 мм), виконувати наскрізні прорізи в зубцях крайніх пакетів.

5) переходити до повітряного охолодження в ТГ слід під час модернізації або оновлення всього устаткування блоку, що є економічно доцільним.

Повітряне охолодження ТГ спрощує конструкцію торцевих щитів і ущільнення валу, уможлиблює зменшення маси неактивної зони виключенням з комплектації ТГ водневого, водяного і оливного обладнання; підвищує коефіцієнт готовності, вибухота пожеже-безпечність, знижує кількість і вартість ремонтів.

У перехідних режимах на поверхні ротора індукуються вихрові струми. Через великі індуктивності обмоток ротора і екрануючу дію його масиву ці струми незначні і формуються тільки в поверхневому шарі, тому практично не впливають на температуру обмотки. Глибина формування вихрових струмів  $h = (2\rho/(\omega \cdot \mu))^{0.5}$  мм, де  $\rho$  – питомий опір сталі ротора ( $\rho > 6,0 \cdot 10^{-7}$  Ом·м);  $\mu$  – магнітна проникність сталі ( $\mu \approx 1,2610^4$  Гн/м);  $\omega$  – кутова частота вихрових струмів, наведених магнітним полем подвійної частоти (100 Гц) в масиві ротора, рад/с. Але ці струми, як показали розрахунки, створюють до-

даткові втрати, які дорівнюють номінальним магнітним втратам в роторі вже у разі значення струму ротора  $I_r = 0,22 \cdot I_{rN}$ , а у разі номінального струму ( $I_r = I_{rN}$ ) значно перевищують номінальні магнітні втрати. Тому в «Правилах технічної експлуатації» встановлені жорсткі обмеження на несиметричні режими.

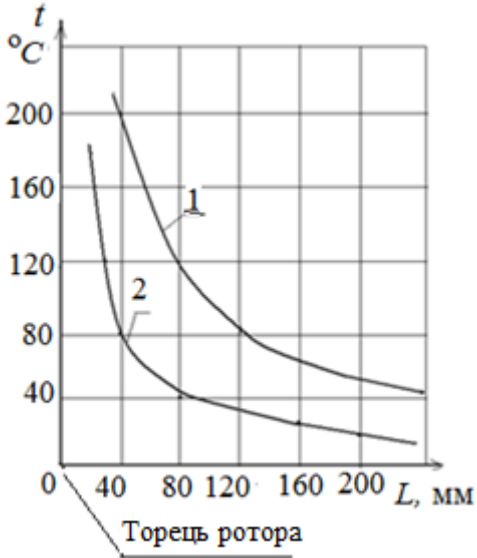


Рис. 4 – Розподіл перевищення температури уздовж довжини клину ротора ТГВ-200-2 від додаткових втрат, що виникають від струмів подвійної частоти при несиметричному навантаженні:

$$1 - I_s^* = 0,3 \text{ в.о.}, \tau = 120 \text{ с}, \\ t_{star} = 30^\circ\text{C}; 2 - I_s^* = 0,6 \text{ в.о.}, \\ \tau = 15 \text{ с}, t_{star} = 17^\circ\text{C}$$

нерівномірність нагріву охолодного газу (або води) в каналах по довжині машини. Часті пуски та зупинки (30–40 разів на рік) призводять до циклічних змін температури ТГ в діапазоні 50–70°C (залежно від часу попереднього простою). Також до циклічних змін температури активних частин ТГ (в 25–35°C) призводить робота з неномінальними навантаженнями. В результаті надійність і довговічність ТГ, які проектувалися для роботи з номінальним навантаженням, знижується.

Розрахована допустима тривалість роботи ТГ з різними діапазонами зміни та різною швидкістю збільшення перевантаження (в 1,5 і 2 рази). Встановлено, що під час раптового збільшення навантаження швидкість відносного подовження стрижня майже на два порядки більша, ніж в разі поступового збільшення. Встановлена допустима швидкість відносного подовження стрижня без можливої деформації і порушень ізоляції в разі поступового збільшення навантаження.

Вихрові струми, що виникають в роторі в несиметричних режимах, в основному замикаються поблизу торцевих зон ротора по контуру «зубці-клини-бандажні кільця». Пазові клини мають більшу теплопровідність, ніж сталь ротора, тому теплові потоки спрямовані до них. Більш низька температура плавлення матеріалу клинів визначила, що саме вони є найбільш вразливим місцем ротора і визначають можливу тривалість роботи з перевантаженням. Експериментальні дані роблять можливим зробити висновок, що перевищення температури ротора у разі віддалення від торцевої зони швидко падає, і в 120–130 мм від торця воно вже невелике ( $I_r^*$  – струм навантаження в в.о. від номінального значення,  $t_{star}$  – температура ротора на початку роботи з несиметричним навантаженням), рис. 4.

Обмежувати швидкість наростання навантаження та знати допустиме перевантаження особливо необхідно для ТГ з безпосереднім охолодженням обмоток, що пояснюється неприпустимістю нерівномірного нагрівання обмотки через можливу деформацію каналів охолодження. Довжина стрижня обмотки змінюється пропорційно швидкості зміни його температури, тобто навантаження. Для ТГ з безпосереднім охолодженням обмоток необхідно враховувати

$$v_{udl} = \varepsilon_m \cdot \frac{j^2}{200} = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{j^2}{200} = (2,1 - 4,0) \cdot 10^{-6} \text{ м/с},$$

та в разі раптового збільшення навантаження:

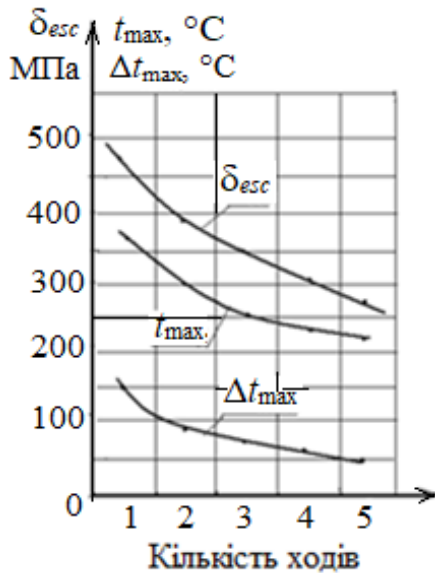
$$v_{udl.max} = \frac{dl}{d\tau} = (125 - 250) \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

де  $\varepsilon_m$  – лінійний коефіцієнт теплового розширення міді,  $\varepsilon_m = 16,5 \cdot 10^{-6}$  1/град;

$\frac{dt}{d\tau} = \frac{j^2}{200}$  – швидкість підвищення температури (густина струму  $j = 5-7$  А/мм<sup>2</sup>).

Розглянуто різні варіанти компоновки теплообмінників, вплив компоновання та кількості ходів газу на теплові напруги, на розподіл температури і на її перепад на поверхні трубок охолоджувача. Для розрахунку площі теплос'єму залежно від виду холодоагенту та від навантаження за умовою збереження габаритів охолоджувача використовувались рівняння нерозривності потоку рідини та рівняння енергетичного балансу, що характеризує усталений рух води в разі умови внутрішнього усталеного балансу. Складена математична модель, що дозволяє вибирати площу теплос'єму залежно від виду холодоагенту в разі зміні навантаження з умовою збереження габаритів охолоджувача (ширина та глибина охолоджувача постійні).

Для врахування ступеня завантаженості ТГ було введено загальний режимний



параметр  $R$ , значення якого залежить від виду, довжини та діаметру трубок в теплообміннику, від кількості ходів газу, виду течії агента охолодження (турбулентне або ламінарне), температури і витрат теплоносія, а також від тиску на вході в охолоджувач. В разі зміні будь-якого фактору параметр  $R$  пропорційно знижується. Для базового варіанту прийнято  $R=1$ . Критерієм найкращої компоновки теплообмінника вибрано мінімальне значення загального режимного параметра  $R$ .

Встановлено зв'язок кількості ходів охолодного газу в теплообміннику ТГ з експлуатаційною тепловою напругою  $\delta_{esc}$ , з розподілом максимальної температури  $t_{max}$  і її перепадом на поверхні трубок  $\Delta t_{max}$  (рис. 5).

Оцінка теплового стану ТГ, який тривалий час в експлуатації, була проведена з використанням пакету SolidWorks, що уможливило отримання даних без фізичного моделювання. Дослідження виконувалося для турбогенератора ТГВ-200-2М з наскрізною вентиляцією зубців трьох перших пакетів і скосом зубців на чотири ступені.

Рисунок 5 – Вплив кількості ходів охолодного газу в теплообміннику ТГ: на експлуатаційні теплові напруги  $\delta_{esc}$ , на розподіл максимальної температури  $t_{max}$ ; на перепад максимальної температури на поверхні трубок  $\Delta t_{max}$



Рисунок 6 – Зміна температури в осерді ТГ по висоті сегмента при різній потужності, при різних типах охолодного середовища

- і швидкості його проходження
- 1 – 200 МВт, водень,  $V=3,75$  м/с;
  - 2 – 200 МВт, повітря,  $V=3,75$  м/с;
  - 3 – 250 МВт, водень,  $V=3,75$  м/с;
  - 4 – 250 МВт, повітря,  $V=3,75$  м/с;
  - 5 – 250 МВт, повітря,  $V=5,0$  м/с

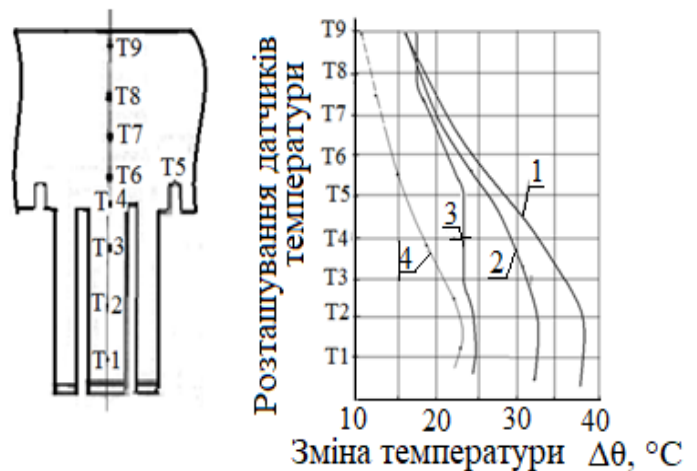
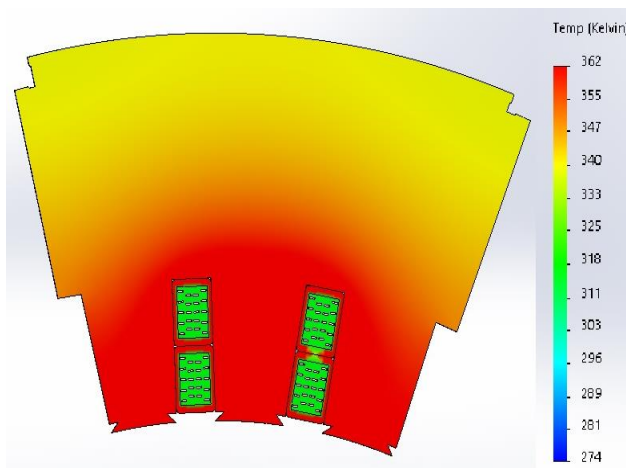


Рисунок 7 – Зміни розподілу температури по висоті зубця ТГВ-200-2М ( $P_N=200$  МВт,  $\cos\phi = 0,85$ )

- 1 – проріз в зубці ненаскрізний, товщина крайнього пакета 31,5 мм;
- 2 – проріз в зубці наскрізний, товщина крайнього пакета 31,5 мм;
- 3 – проріз в зубці ненаскрізний, товщина крайнього пакета 23,5 мм;
- 4 – проріз в зубці наскрізний, товщина крайнього пакета 23,5 мм

Визначено розподіл температури по висоті зубця, встановлено, що для зниження нагріву осердя статора (на прикладі підвищення потужності ТГВ-200-2 на 50 МВт) до меж, які визначаються заводом-виробником ( $+90^\circ\text{C}$ ), необхідно збільшити швидкість проходження повітря в ТГ від 3,75 м/с до 5,0 м/с (рис. 6, рис. 7).

У «повітряних» ТГ найбільш часто використовуються оребрені трубки охолодження: матеріал трубки охолодження – мідна дротова навивка, профіль – труба ДКРНМ  $d \times 1$  МД 10-70-1, ( $d$  – зовнішній діаметр трубки, мм).

Для оребреної циліндричної трубки була розрахована і побудована графічна залежність коефіцієнта теплопередачі і швидкості течії води в трубках охолоджувача від необхідного об'єму води, що проходить через трубки,  $k_T(Q_{water})$  та  $v_{water}(Q_{water})$ , визначено рекомендований діапазон використання охолоджувачів.

Для вертикального розташування охолоджувачів враховано, що плин рідини відбувається в полі сили тяжіння.

Зібрано дані, проведено аналіз і систематизовані несправності систем охолодження ТГ, розроблена схема проведення діагностики і здійснення ремонту систем охолодження ТГ що необхідно для своєчасної діагностики та усунення дефектів. Розроблені рекомендації щодо проведення ремонтів охолоджувачів; визначено причини їх руйнування і причини незадовільної роботи як працюючих, так і нових охолоджувачів.

**В четвертому розділі** досліджено особливості експлуатації, сервісного обслуговування та ремонтів ТГ, які експлуатуються тривалий час, розроблено пропозиції щодо продовження терміну їх роботи. Особливістю є більш часта поява дефектів, ніж в ТГ, які працюють в межах паспортного терміну і тільки в номінальних режимах, що підтверджується даними, зібраними при обслуговуванні і ремонтах ТГ на блоках ТЕС і АЕС. Кількість встановлених на станціях ТГ недостатня для створення статистично однорідної вибірки для повної оцінки особливостей таких режимів, але орієнтовна оцінка можлива. Також в даний час, крім технологічних і експлуатаційних ризиків, необхідно враховувати і ринкові: ціна, кон'юнктура, конкуренція на ринках збуту. Встановлено, що до таких дефектів першочергово слід віднести руйнування шихтованих пакетів осердь статорів і елементів їх кріплення до корпусу, дефекти ізоляції, деформації провідників обмоток з безпосереднім охолодженням.

Для прогнозування ризиків появи конкретних дефектів, що поліпшить діагностику ТГ перед проведенням ремонтів, запропоновано визначати ймовірність, що подія  $A$  (поява дефекту) відбудеться  $k$  раз з  $n$  можливих (за теоремою Бернуллі). Встановлено, що ймовірність появи дефектів в 10 з 10 ТГ становить 11 %, які за зниженням ризиків і значущості наслідків можна перелічити: технологічні та експлуатаційні дефекти ізоляції обмоток статора; руйнування торцевих зон осердь статорів; зниження ступеня опресування, що призводить до руйнування бандажів і ізоляції обмоток, до посилення вібрації; порушення кріплення лобових та пазових частин обмоток статора; поява тріщин в паяних з'єднаннях головок лобових частин, нещільності порожнистих провідників; обрив болтів кріплення натискних плит і зливних колекторів; порушення оливних ущільнень валів ТГ з водневої системою охолодження; втомні тріщини в сполучних трубках подачі води до виводів обмотки статора, в системі охолодження шин, в зварних швах напірного і зливного колекторів і т. ін.

Запропонована класифікація ушкоджень ТГ, які довго перебували в експлуатації, з метою визначення можливості продовження їх роботи. Встановлена необхідність отримувати дані в режимі *on-line*, обробляти їх і зводити в таблиці для порівняння поточних показників з допустимими, що уможливорює своєчасно прогнозувати появу дефектів. Запропонована форма таких таблиць. Також доведено, якщо відношення кількості виявлених дефектів і пошкоджень до загальної кількості можливих дефектів і пошкоджень перевищує 50 %, то будь-який вид ремонту недоцільний, і рекомендується повна заміна ТГ або його основних елементів (статора або ротора).

Визначено вплив якості технології виготовлення і схеми складання шихтованих осердь, експлуатаційних змін тиску опресування осердя на надійність і довговічність

експлуатації всього ТГ. Проаналізовано причини зміни рівня опресування, як на етапі виготовлення, так і протягом усього експлуатаційного періоду. Встановлено, як зміна тиску опресування впливає на вібрацію, нагрів, втрати ТГ. Запропоновано вважати вібрацію найбільш результативним показником стану ТГ, що відповідає загальносвітовій тенденції відмови від системи планово-попереджувальних ремонтів і переходу до ремонтів за реальним станом. Доведено, що в разі експлуатації ТГ в неномінальних режимах знос системи кріплення осердя статора до корпусу збільшується і призводить до ударної взаємодії між листами осердя. Порушені в місці удару хвилі поширюються по елементах конструкції ТГ, спричиняють їхню деформацію, а до спектру частот коливань корпусу додають гармоніки, кратні частоті електромагнітних сил (100 Гц).

Для встановлення впливу неповного завантаження ТГ ( $\beta \approx 0,7$ ) на вібростан підшипників були проведені додаткові дослідження. Встановлено, що в разі зниженні завантаження ТГ, вібрація підшипникових опор збільшується. Також збільшення вібрації підшипникових опор було встановлено під час перевантаження генераторів і роботі з  $\cos\varphi = 0,85 - 0,90$ . Тому можна рекомендувати під час експлуатації ТГ для підтримки значень віброшвидкостей в допустимих межах підтримувати  $\cos\varphi_N = 0,95$ .

З використанням теорії деформації багатошарових структур розроблено модель, яка уможливує виконання оцінки впливу склеювання, схем складання і відносного ковзання листів на згинальну жорсткість осердя, що є показником його надійності. Визначено вплив сил, що викликають згинальну деформацію і призводять до відносного руху листів на стан шихтованого осердя. Були розглянуті три варіанти складання сталевих листів: з перекриттям на  $1/2$ ,  $1/3$  і  $1/4$  листа. В результаті розрахунків встановлено збільшення згинальної податливості шихтованої сталеві ділянки в порівнянні з суцільною ділянкою такого самого поперечного перерізу – відношення  $\Delta R / \Delta R_0$ . Встановлено, що відносна піддатливість шихтованої ділянки ( $\Delta R / \Delta R_0$ ) залежить від довжини і товщини листів, схеми складання, характеристик сталі і товщини ізоляційного шару. Зі збільшенням довжини шихтованого пакету податливість зменшується. Для ізоляційного шару такої залежності немає, і максимальні дотичні напруги в ізоляції пропорційні довжині і товщині листів, залежать від схеми їх складання, характеристик сталі та товщини ізоляційного шару. Встановлено, що руйнування ізоляційного шару листів шихтованого осердя в процесі експлуатації поступово зменшується через зменшення тиску пресування, значення якого повинно вибиратися з урахуванням можливого ковзання листів, знання міцності клейового шару і розмірів зон допустимих ковзань. Можна стверджувати, що за підтримки достатнього рівня пресування осердь строк експлуатації ТГ може бути значно збільшений.

Для розрахунку додаткових сил в шихтованих осердях ТГ було розглянуто дію електромагнітних сил (ЕМС), які створюються потоками розсіювання в спинці осердя статора і в елементах його кріплення до корпусу. Для дослідження впливу зміни ЕМС в різних режимах розглядали вплив зміни активної  $P$  і реактивної  $Q$  потужностей та напруги обмотки статора. Під час роботи міняли значення одного з параметрів ( $P$ ,  $Q$ ,  $U_S$ ), в той час, як два інших параметра не змінювали (на прикладі ТГВ-200-2, блок № 2 Зміївської ТЕС). Встановлено, що в неномінальних режимах роботи ТГ додаткова величина ЕМС, наведена потоками розсіювання, мало залежить від змін активної і реактивної потужності: в разі зміні  $P$  і  $Q$  на 10 % ЕМС змінювались на 1–2%. Залежність ЕМС від

напруги більш значна і носить квадратичний характер. Додаток цих ЕМС до основних ЕМС від магнітних потоків розсіювання сприяє прискоренню деградації шихтованого осердя.

Розраховані додаткові аксіальні зусилля в осерді, що виникають від дії потоків розсіювання і замикаються через елементи конструктивної частини ТГ. Для визначення ЕМС між листами шихтованого пакету запропоновано листи осердя представляти прямокутними призмами, на поверхні граней яких циркулюють струми, а взаємодію між пластинами звести до взаємодії цих поверхневих плівкових струмів. Встановлено, що в середині пакету дією сил від поверхневих струмів можна знехтувати, але ці сили достатньо значні для крайніх листів, у яких немає сусідніх пластин з однією із сторін. Зроблено висновок, що ці сили сприяють руйнуванню зубцевої зони не тільки в торцевих, а й в центральних пакетах осердя, біля вентиляційних каналів, а також в пакетах, розташованих безпосередньо після склеєних пакетів, тому що після відгинання крайнього листа умовно крайнім стає наступний лист і для нього дія розглянутих сил також стає значною, як і для першого листа, і так далі – ефект «доміно».

Сформульовано перелік вимог, яким повинна задовольняти конструкція лобових частин для забезпечення синхронізації вібрацій окремих елементів в «кошику», зниження температурних напружень, підтримки властивостей під час тривалої експлуатації, забезпеченні технологічності і ремонтпридатності.

Встановлені основні дефекти працюючих і нових охолоджувачів, запропоновані прийоми діагностики і усунення їх дефектів. Розроблена схема діагностування і проведення ремонтів систем охолодження турбогенераторів.

У додатках наведено порівняння характеристик різних типів електростанцій України; механічний розрахунок конструкції зовнішнього щита турбогенератора зі зменшеними масогабаритними показниками; механічні розрахунки корпусу турбогенератора зі зменшеними масогабаритними показниками; тепловий і аеродинамічний розрахунок модернізованої конструкції газоохолоджувачів для ТГВ-200-2; акти впровадження та використання результатів роботи (на ВП «Запорізька АЕС», на ВП «Хмельницька АЕС», на ДП «Завод «Електроважмаш», на Зміївський ТЕС, на ПрАТ «Харківська ТЕЦ-5»; в навчальному процесі НТУ «ХП», НУ цивільного захисту України, Харківського Регіонального інституту проблем громадської охорони здоров'я, Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського); список публікацій здобувачки.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблені технічні і технологічні заходи щодо підвищення енергоефективності нових ТГ і ТГ, які тривалий час в експлуатації, забезпеченню їхньої ефективної роботи під час тривалої експлуатації з урахуванням особливостей роботи на сучасну енергосистему, підтримки науково-технічної конкурентоспроможності нових ТГ. Розроблені наукові напрямки дослідження і вдосконалення ТГ, які тривалий час в експлуатації, і нових ТГ для підтримки їх конкурентоспроможності. Робота містить нові, науково обґрунтовані результати в області діагностики і підвищення надійності ТГ, які мають теоретичне, розрахунково-методичне та практичне значення. Узагальнені та проаналізовані дані, що були зібрані на блоках ТЕС і АЕС при прове-

денні обслуговування і ремонтів; створені математичні моделі та запропоновані алгоритми розрахунку теплових, механічних та електромагнітних процесів в ТГ.

Для цього були вирішені наукові задачі:

1. Встановлено, що розвиток турбогенераторобудування залежать від напрямків розвитку електроенергетики. Для визначення її перспективних напрямків і, відповідно, перспективних напрямків турбогенераторобудування, використовували системний підхід, враховували циклічність розвитку, досягнення в електромашинобудуванні та в супутніх галузях. Ґрунтуючись на теорії циклічного розвитку (теорії «довгих хвиль» Кондратьєва М. Д.), проаналізовані перспективи і можливі напрямки розвитку електроенергетики; доведено, що натеper і протягом довгого часу теплова енергетика буде основною в забезпеченні країни електроенергією, і що робота з вдосконалення ТГ, підвищення їх надійності з урахуванням особливостей експлуатації є актуальною. А також що для України найбільш перспективний і реальний стабілізаційно-стагнаційний сценарій розвитку, під час якого економіка, промисловість, соціальні програми залежать від стабільності і достатності забезпечення електроенергією, від надійності функціонування системи «електроенергетика» і першочергово від надійності роботи ТГ. Систематизовані дефекти ТГ, виконана оцінка ймовірності їх появи, що може бути використано під час складання програми проведення ремонтних робіт. Розроблені пропозиції щодо використання нових конструкцій і матеріалів, вдосконалених технологій.

2. Особливу увагу приділено вирішенню питання підтримки конкурентоспроможності ТГ вітчизняного виробництва на світовому ринку. Для цього встановлено основні напрямки, де зазначено відставання від світових аналогів: розглянуте питання підвищення потужності ТГ в одиниці виконання і зниження питомої маси. Для працюючих на станціях ТГ потужністю 200–300 МВт розглянуто питання підвищення потужності без зміни габаритів, доведена можливість заміни водневого на повітряне охолодження.

Зниження питомої маси ТГ запропоновано виконувати шляхом уніфікації елементів і складальних вузлів з урахуванням конструкційних змін, пов'язаних з інтенсифікацією охолодження і заміни агенту охолодження (водню на повітря). Доведено, що сумарні маса і втрати декількох ТГ завжди більші від маси (відповідно, вартості) і втрат одного ТГ тієї самої сумарної потужності: в разі застосування одного ТГ, замість  $m$  генераторів меншою, але такою самою в сумі потужності, питома матеріаломісткість, вартість і втрати зменшуються приблизно в  $\sqrt[4]{m}$ . Це можна вважати доказом доцільності підвищення потужності ТГ в одиниці виконання. Розроблені практичні рекомендації щодо зменшення ваги і габаритів конструкційних елементів ТГ: корпусу, приставних коробів, зовнішніх і внутрішніх захисних щитів. Запропоновано при використанні повітряного охолодження знижувати температуру води на вході в охолоджувач від +37 до +33°C і збільшувати об'єм води, що проходить через охолоджувач (від 100 м<sup>3</sup>/год до 120 м<sup>3</sup>/год), збільшувати її швидкість від 1,3 м/с до 1,9 м/с. Витрати охолодного газу можна знизити від 60 до 55 м<sup>3</sup>/с виключенням можливості формування вихрових (турбулентних) потоків в контурі охолодження ТГ, які проходять, минаючи теплообмінник. Запропоновано знизити запас тепловіддачі від 26 % до нормативно допустимого значення (20 %), і в разі заміни водню на повітря підвищити швидкість проходження повітря через охолоджувач від 3,75 до 5 м/с. Технічний рівень виробництва залежить від

рівня технологічної оснащеності, тому запропоновано як критерій визначення технічного рівня підприємства-виробника використовувати загальний коефіцієнт технологічної оснащеності, а також часткові коефіцієнти технологічної оснащеності різних видів технологічних операцій. Наведено алгоритм їх розрахунку.

3. Доведено, що зниження масогабаритних показників ТГ можливе шляхом вибору нових ізоляційних і конструкційних матеріалів (вибору стандартних профілів, зменшення перерізів мало навантажених деталей, заміни сталевих деталей на деталі зі сплавів та композиційних матеріалів). Запропоновано використовувати метод конструктивно-технологічної поелементної обробки, для чого розроблено алгоритм розрахунків деталей ТГ складних форм на міцність і жорсткість при різних деформаціях, запропоновані коефіцієнти, що дозволяють враховувати «старіння» матеріалів і вплив ударних навантажень. Запропоновані рішення щодо підвищення надійності кріплення стрижнів обмотки статора при модернізації ТГ (за умови збереження габаритів і одночасному збільшенні потужності). Для охолодження обмотки ротора запропоновано використовувати поділ ходів газових потоків в пазовій і лобовій частинах для зниження робочого тиску і зменшення витрат газу. Встановлено вплив кількості ходів охолодного газу в теплообміннику ТГ на розподіл температури та її перепад по поверхні трубок.

4. Виконано порівняння масогабаритних показників конструкцій ТГ з водневим і повітряним охолодженням, запропоновані зміни конструкції повітряних ТГ, які дозволяють забезпечити надійність і підвищити потужність без зміни габаритів. Вказані переваги, недоліки і відмінності конструкцій «повітряних» ТГ у порівнянні з «водневими» генераторами. При модернізації ТГ з водневим охолодженням запропоновано на кінці струмопровідних стрижнів наносити ізоляцію, розділену на шари прокладками з алюмінієвої фольги, яка вирівнює електричне поле в радіальному напрямку, знижує ймовірність появи коронного розряду.

Доведено, що слід обмежувати швидкість наростання навантаження в ТГ для зниження температурних деформацій обмоток і що це найбільш небезпечно для обмоток з безпосереднім охолодженням. Для підвищення межі текучості міді обмоток запропоновано додавати срібло в мідь (200–300 г/тонну). Встановлено, що пазові клини обмотки статора мають більшу теплопровідність, ніж сталь ротора, тому теплові потоки спрямовані до них і саме вони обмежують допустиму тривалість роботи ТГ з перевантаженням. На підставі отриманого розподілу температури по висоті зубця статора запропоновані конструкційні зміни зубцевої зони: запропоновано виконувати наскрізну вентиляцію (прорізи) в зубцях крайнього пакета і виконувати скіс зубців до половини їх висоти.

5. ТГ, які тривалий час в експлуатації, мають особливості під час обслуговування та проведення ремонтів: під час виконанні механічних розрахунків треба враховувати знос сполучених елементів; необхідно встановлювати додаткові датчики для контролю стану ТГ в режимі *on-line*, кількість яких слід обмежувати для зниження навантаження на операторів блоків, і т. ін. Доведено, що на надійність роботи ТГ впливає стан його осердя, рівень опресування, що особливо значно в разі експлуатації ТГ в неномінальних режимах і що за підтримки достатнього рівня опресування осердя термін експлуатації ТГ може бути значно більшим за 20–30 років, який встановлено натепер. Запро-

понована методика розрахунку взаємного переміщення шихтованих листів залежно від схеми укладання для встановлення ширини зони ковзання в разі ослаблення пресування. Показана залежність цих факторів від дії сил, що призводять до згинальної деформації, і від стану ізоляції листів сталі в період «старіння». З використанням теорії деформації багатошарових структур розроблена модель оцінки впливу склейки, схеми укладання і відносного ковзання листів сталі на згинальну жорсткість осердя.

Запропонована модель розрахунку сил, діючих між листами шихтованого осердя. Можна вважати, що саме добавка сил до сил, створених потоками розсіювання від струмів в обмотках ротора і статора, сприяє руйнуванню осердя не тільки в торцевих, а й в центральних пакетах, а також в пакетах, розташованих безпосередньо після групи крайніх склеєних пакетів.

Розраховані межі допустимої швидкості наростання навантаження в ТГ з урахуванням обраної системи охолодження. Визначено, що перепади температури по товщині ізоляції ТГ досягають 5–15 °С через різну температуру сусідніх елементів (міди провідника і сталі стінок паза). У разі значного різкого подовження мідних стрижнів в їх ізоляції виникають механічні напруги, що може привести до її розриву. У високовольтних ТГ (при  $U_s \geq 27$  кВ) товщину пазової ізоляції необхідно збільшити в 1,5–2,0 рази, і очікуваний перепад температури становитиме 30–35 °С. Зроблено висновок, що подальше підвищення напруги для підвищення потужності ТГ при видах ізоляції, що використовують натеper, поки безперспективно.

Визначено, як матеріал, компоновка трубок і кількість ходів охолодного середовища в теплообміннику ТГ впливає на розподіл температури по теплообмінній поверхні, на експлуатаційні теплові напруги, на розподіл максимальної температури та її перепад по поверхні трубок для порівняння продуктивності теплообмінника з величиною втрат, що відводяться. Для проведення більш точного розрахунку теплового стану ТГ створена тривимірна модель зубцевої зони і за допомогою програмного комплексу *SolidWorks* отримані дані про тепловий стан вузлів ТГ без створення фізичної моделі.

6. За зібраними статистичними даними систематизовані несправності охолоджувачів ТГ, запропоновані способи їх діагностики і ремонту; вказані можливі причини незадовільної роботи нових охолоджувачів. Запропонована класифікація несправностей систем охолодження сприяє більш цілеспрямованій підготовці персоналу станцій до оперативних дій у разі аварії. Встановлено, що для ТГ, які тривалий час в експлуатації, необхідно установлювати додаткові датчики контролю; рекомендовано виконувати ремонти не за системою планово-попереджувальних ремонтів, а за реальним станом ТГ (за результатами *on-line* діагностики, експертних оцінок і прогнозу стану). Значне збільшення каналів контролю неможливо через збільшення навантаження на операторів блоків станцій, тому, як найбільш інформативний показник технічного стану ТГ в процесі роботи, запропоновано обирати значення вібрації (віброприскорення) і додатково встановлювати тільки вібродатчики.

Розглянуті проблеми і запропоновані напрямки поліпшення професійної підготовки робітників ТЕС і АЕС, визначені шляхи підвищення їх економічної зацікавленості для утримання в національній електроенергетиці.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Модели и методы параллельной реализации логических операций в АСУ ТП: монография / В. В. Шевченко, В. И. Барсов, И. А. Фурман, М. Л. Малиновский. Харьков: Издательство «НТМТ», 2009. 140 с. DOI: 10.5281/zenodo.2529088

*Автором складені схеми і проаналізовані розглянуті технологічні процеси.*

2. Шевченко В. В., Кузьмин В. В., Минко А. Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов: монография. Харьков: СПДФЛ Чальцев А.В., 2012. 246 с. DOI: 10.5281/zenodo.2536960.

*Автором розроблено методи досліджень, зібрані данні и виконані розрахунки, проведено аналіз результатів і зроблені висновки.*

3. Шевченко В. В., Минко А. Н. Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов: монография. Харьков: Изд. Иванченко И.С., 2013. 242 с. DOI: 10.5281/zenodo.2550832.

*Автором зібрані данні и виконані розрахунки, написані окремі розділи, зроблені висновки.*

4. Шевченко В. В. Перспективы создания конкурентоспособных турбогенераторов ТЭС и АЭС: монография. Германия, Саарбрюккен: Издательство Ламберт (LAP Lambert Academic Publishing), 2016. 144 с. DOI: 10.5281/zenodo.2593466

5. Shevchenko V. V. Influence of Manufacturing Quality of Laminated Core on a Turbogenerator Exploitation Term // Electrical Engineering & Electromechanics. 2016. № 4. С. 28-33. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.4.04

6. Shevchenko V. V. Proposals for Improving the Technical State of Turbogenerators in Excess of the Service Life // Proceedings of International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017): Institute of Electrical and Electronics Engineers. USA, New Jersey, 2017. (Kremenchug, November 15-17, 2017). Track 1 «Electromechanics». Pp. 156-159. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248876

7. Shevchenko V. V., Milykh V. I.; Pototskyi D. V. Technical and Economic Aspects of Electric Machine Industry Development with Account of Electric Power Development Directions. // Electrical Engineering & Electromechanics. 2014. № 2. Pp. 60-63. DOI: 10.20998/2074-272X.2014.2.14.

*Автору належить розробка і обґрунтування методів підвищення надійності, висновки*

8. Shevchenko V. V., Minko A. N., Strokous A. V. Analysis of Electromagnetic Vibration Forces in the Elements of the Stator Mounting of the Turbogenerator to the Case under Non-Nominal Modes of Operation // Electrical Engineering & Electromechanics. 2018. № 5. Pp. 29-33. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.5.05

*Автору належить оцінка особливостей роботи ТГ при роботі в неномінальних режимах та при перевищенні строків експлуатації, розробка методів розрахунків, висновки.*

9. Shevchenko V. V. The Reform of the Higher Education of Ukraine in the Conditions of the Military-Political Crisis // International Journal of Educational Development. 2018. № 65. Pp. 237-253. DOI: 10.1016/j.ijedudev.2018.08.009

10. Shevchenko V. V., Minko A. N. Improving Heat Exchange Systems of Turbogenerators for Increase of their Efficiency // Problemele Energeticii Regionale (Moldova, Kishinev), 2019. 1(39). Pp. 80-89. DOI: 10.5281/zenodo.2650425

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів в період подовження експлуатації, розробка моделей оцінки ефективності охолоджувачів, висновки.*

11. Шевченко В. В., Шевченко С. Е. Направления и перспективы использования специальных типов генераторов для энергетических установок с возобновляемыми источниками энергии // Системы обработки информации, 2004. № 9(37). С. 213-217. DOI: 10.5281/zenodo.2526359

*Автору належить постановка задачі та порівняння різних типів генераторів, висновки.*

12. Шевченко В. В., Соловьев М. В. Проблемы и перспективы создания высоковольтных генераторов // Системы обработки информации, 2005. № 6(46). С. 177-186. DOI: 10.5281/zenodo.2527045

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

13. Шевченко В. В., Гавриш А. Ю. Современное состояние и перспективы использования сверхпроводников в электроэнергетике // Системы обработки информации, 2005. № 5(45). С. 194-203. DOI: 10.5281/zenodo.2527039

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, аналіз сучасного стану використання надпровідників, висновки.*

14. Шевченко В. В., Богма С. А. Проблемы работы ядерных энергетических установок АЭС в ненормальных режимах // Системы обработки информации, 2007. № 1(59). С. 134-140. DOI: 10.5281/zenodo.2527175

*Автору належить розробка підходів, методів та моделей досліджень, висновки.*

15. Шевченко В. В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине // Энергетика и электрификация, 2007. № 7(287). С. 11-16. DOI: 10.5281/zenodo.2527618

16. Шевченко В. В., Шевченко С. Е., Шуджан Р. Я. Предложения по использованию сверхпроводников в электротехнических устройствах // Сборник научных трудов Харьковского университета воздушных сил им. И. Кожедуба, 2007. № 1(13). С. 96-101. DOI: 10.5281/zenodo.2527127

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

17. Шевченко В. В., Лизан И. Я., Шевченко С. Е. Атомная энергетика: способы и проблемы хранения отработанного ядерного топлива // Сборник научных трудов Харьковского университета воздушных сил им. И. Кожедуба, 2007. № 9(67). С. 147-153. DOI: 10.5281/zenodo.2527127.

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

18. Шевченко В. В., Баженов А. С., Лавриненко Т. А. Конструкции ветроэнергетических установок при решении проблем промышленной энергетики // Системы обработки информации, 2008. № 3(70). С. 151-156. DOI: 10.5281/zenodo.2527901

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

19. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н., Назаров В. А. Повышение мощности гидрогенераторов при модернизации без изменения их габаритных размеров. Системы обработки информации, 2008. № 5(72). С. 136-142. DOI: 10.5281/zenodo.2528881

*Автору належить постановка задачі, аналіз особливостей конструкцій гідрогенераторів, обробка даних, висновки.*

20. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н. Энергосбережение в энергосистемах. Анализ, проблемы, перспективы // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета им. М. Остроградского, 2009. Т. 1. № 3/2009(56). С. 161-166. DOI: 10.5281/zenodo.2529093

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

21. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н., Заныхайло Е. А. Анализ особенностей работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для энергетических установок ТЭС и АЭС // Системы управления, навигации и связи, 2009. № 4(12). С. 135-142. DOI: 10.5281/zenodo.2529538

*Автору належить розробка підходів досліджень, вибір і виконання аналізу характеристик різних матеріалів, висновки.*

22. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н., Назаров В. А. Повышение мощности гидрогенераторов при модернизации без изменения их габаритных размеров. Системы обработки информации, 2008. № 5(72). С. 136-146. DOI: 10.5281/zenodo.2528881

*Автором проведено оцінку впливу режимів навантаження на показники надійності генеруючого обладнання, висновки.*

23. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Проблемы и способы передачи электроэнергии при полной выдаче мощности электростанциями // Наукові праці ДонНТУ. 2008. № 16(142). С. 284-288. DOI:10.5281/zenodo.2528894

*Автору належить постановка задачі, обробка даних, висновки.*

24. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Обзор перспективных направлений энергосбережения в электромашиностроении // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. Наук. журнал, 2009. № 2/(19). С. 104-109.

DOI: 10.5281/zenodo.2528910

*Автору належить розробка підходів, методів та моделей досліджень, висновки.*

25. Шевченко В. В., Омельченко Л. М. Інноваційні підходи до формування у студентів компетентності енергозбереження при вивченні технічних дисциплін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського, 2009. № 3/2009(56). Част. 1. С. 13-16. DOI: 10.5281/zenodo.2529099

*Автору належить розробка принципів, методів, засобів обробки інформації, висновки.*

26. Шевченко В. В., Лизан И. Я., Бирюков В. В. Широотно-импульсное преобразование напряжений как фактор повышения ресурса электронагревателей парогенераторного цикла блока АЭС // Научные труды ДонНТУ. Серия «Вычисл. техника и автоматизация», 2010. № 18(169). С. 121-125. DOI: 10.5281/zenodo.2530957

*Автору належить розробка підходів, методів та моделей досліджень, висновки.*

27. Шевченко В. В., Минко А. Н. Сравнительная оценка массогабаритных пара-

метров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения // Вестник НТУ «ХПИ», 2010. № 3. С. 108-112. DOI: 10.5281/zenodo.2529586

*Автору належить розробка підходів, методів та моделей досліджень, порівняння конструкцій ТГ з водневою та повітряною системами охолодження, висновки.*

28. Шевченко В. В., Пидкивка С. В., Шевченко С. Е. Анализ особенностей работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для сверхпроводниковых турбогенераторов // Сборник научных трудов ХУВС им. И. Кожедуба, 2010. № 1(23). С. 164-169. DOI: 10.5281/zenodo.2529569

*Автору належить розробка до підходів досліджень, вибір і виконання аналізу характеристик різних матеріалів, висновки.*

29. Шевченко В. В., Минко А. Н. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», 2010. № 3. С. 108-112. DOI: 10.5281/zenodo.2529586

*Автору належить розробка методів та шляхів оптимізації, висновки.*

30. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н. Вопросы энергосбережения на основе использования на ТЭС низкосортных топлив // Системы управления, навигации и связи, 2010. № 3(15). С. 149-154. DOI: 10.5281/zenodo.2529937

*Автору належить розробка методики досліджень та висновки.*

31. Шевченко В. В. Особенности пуска и самозапуска электродвигателей собственных нужд атомных электростанций // Вестник НТУ «ХПИ», 2010. № 46. С. 226-234. DOI: 10.5281/zenodo.2529911

*Автору належить розробка методики досліджень, побудова характеристик двигунів різних типів та висновки.*

32. Шевченко В. В., Космин С. Н. Особенности работы приводных двигателей технологических насосов реакторной зоны АЭС // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета им. М. Остроградского, 2010. № 4/2010(63). Т. 2. С. 79-83. DOI: 10.5281/zenodo.2529574

*Автору належить дослідження різних режимів експлуатації турбогенераторів в залежності від завантаження, висновки.*

33. Шевченко В. В., Пидкивка С. В. Разработка предложений по использованию генераторов с постоянными магнитами в энергетических установках // Сборник научных трудов ХУВС им. И. Кожедуба, 2010. № 4(26). С. 188-192. DOI: 10.5281/zenodo.2530417

*Автору належить дослідження різних режимів експлуатації турбогенераторів в залежності від завантаження, висновки.*

34. Шевченко В. В., Лизан И. Я., Михальченко А. Г. Основы построения комплексной системы обучения и подготовки специалистов по основам энергосбережения // Современные проблемы многоуровневого образования, 2011. № 3(13). С. 34-40. DOI: 10.5281/zenodo.2532861

*Автору належить обґрунтування перспективних методів навчання, висновки.*

35. Шевченко В. В., Кузьмин В. В., Минко А. Н. Об оптимальном использовании материалов и снижении массогабаритных показателей торцевой зоны неактивных ча-

стей турбогенераторов // Вестник НТУ «ХПИ», 2011. № 6. С. 106-112.

DOI: 10.5281/zenodo.2530993

*Автору належить розробка принципів і методів, висновки.*

36. Шевченко В. В. Оценка технической и экологической перспективы развития энергетики Украины // Качество технологий и образования, 2011. № 2. С. 19-25.

DOI: 10.5281/zenodo.2532870

37. Шевченко В. В., Кузьмин В. В., Минко А. Н. Оптимизация массы и размеров элементов неактивной зоны турбогенераторов с воздушной системой охлаждения // Вестник Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, 2011. Т.1. № 6/2011(71). С. 100-104. DOI: 10.5281/zenodo.2535836

*Автору належить обґрунтування вибору методів діагностики, розрахунки, висновки.*

38. Шевченко В. В., Кузьмин В. В., Минко А. Н. Эффективная компоновка неактивной части турбогенератора – основное средство оптимизации массогабаритных параметров турбогенератора // Проблемы машиностроения, 2011. № 1(14). С. 3-8.

DOI: 10.5281/zenodo.2531060

*Автору належить розробка принципів, розрахунки, висновки.*

39. Шевченко В. В., Пикалов А. А. Режимы и особенности конструкций синхронных гидрогенераторов-двигателей для ГАЭС // Электромеханические и энергосберегающие системы Кременчугского гос. университета им. М. Остроградского, 2011. № 1/2011(13). С. 80-85. DOI: 10.5281/zenodo.2531075

*Автору належить порівняння конструкцій і характеристик синхронних машин в різних режимах, розрахунки, висновки.*

40. Шевченко В. В., Лизан И. Я., Шевченко С. Е. Определение риска и вероятности возникновения пожара на АЭС // Системы управления, навигации и связи, 2011. № 1(17). С. 259-64. DOI: 10.5281/zenodo.2532045

*Автору належить обґрунтування проблеми, підходи та висновки щодо аналізу даних експлуатації, висновки.*

41. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Проблемы, перспективы и основные направления развития экологически чистых источников электроэнергии в Украине // Качество технологий и образования, 2011. № 1. С. 77-88. DOI: 10.5281/zenodo.2532073

*Автору належить обґрунтування проблеми, висновки щодо аналізу даних експлуатації.*

42. Шевченко В. В., Пикалов А. А. Режимы и особенности конструкций синхронных гидрогенераторов-двигателей для ГАЭС // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2011. № 1/(13). С. 80-85. DOI: 10.5281/zenodo.2531066

*Автору належать дослідження режимів і особливостей конструкцій ТГ, аналіз, висновки.*

43. Шевченко В. В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, 2012. № 29. С. 77-81. DOI: 10.5281/zenodo.2536755

44. Шевченко В. В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации // Системы обработки информации, 2012. № 7(105). С. 152-155. DOI: 10.5281/zenodo.2542017

45. Шевченко В. В., Дубяга Р. В. Роль атомных электростанций в электроснабжении Украины и безопасность их эксплуатации // Электрика, 2012. № 7. № 34-39. DOI: 10.5281/zenodo.2538505

*Автору належить обґрунтування перспективності використання атомної енергетики, напрямки забезпечення безпеки експлуатації, висновки.*

46. Шевченко В. В. Основные задачи, проблемы и направления развития отечественного турбогенераторостроения // Энергетика и электрификация, 2012. № 10(350). С. 33-39. DOI: 10.5281/zenodo.2541833

47. Шевченко В. В., Кузьмин В. В. Роль человеческого фактора в обеспечении надежности работы АЭС в Украине // Электрика, 2012. № 3. С. 38-43. DOI: 10.5281/zenodo.2536815

*Автору належить обґрунтування використання різних методів підготовки персоналу, висновки.*

48. Шевченко В. В., Минко А. Н., Кузьмин В. В. Оценка параметрических связей массогабаритных параметров турбогенераторов с уровнем трудоемкости их производства // Вестник НТУ «ХПИ», 2012. № 7. С. 165-169. DOI: 10.5281/zenodo.2542901

*Автору належить обґрунтування вибору методів, розрахунки, висновки.*

49. Шевченко В. В. Перспективная оценка совершенствования энергетической системы Украины // Электрика, 2012. № 9. С. 10-15. DOI: 10.5281/zenodo.2538718

50. Шевченко В. В., Минко А. Н., Кузьмин В. В. Оценка параметрических связей массогабаритных параметров турбогенераторов с уровнем трудоемкости их производства // Вестник НТУ «ХПИ», 2012. № 7. С. 165-169. DOI: 10.5281/zenodo.2542901

*Автору належить розробка методів та моделей досліджень, висновки.*

51. Шевченко В. В., Лутай С. Н. Системный подход к развитию энергетики Украины // Вестник Кременчугского нац. университета им. М. Остроградского, 2012. № 3/2012(74). С. 28-32. DOI: 10.5281/zenodo.2538647

*Автору належить аналіз перспективних існуючих сценаріїв та обґрунтування вибору перспективних напрямків розвитку енергетики, висновки.*

52. Шевченко В. В. Системный подход к вопросам оценки технического состояния электрооборудования энергосистем Украины // Электрика, 2013. № 1. С. 6-10. DOI: 10.5281/zenodo.2544208

53. Шевченко В. В. Сценарии развития электроэнергетики Украины // Системы управления, навигации и связи, 2012. № 3(23). С. 151-155. DOI: 10.5281/zenodo.2542841

54. Шевченко В. В., Кузьмин В. В. К вопросу анализа нагрузочных режимов синхронных компенсаторов // Гидроэнергетика Украины, 2013. № 1. С. 48-53. DOI: 10.5281/zenodo.2549722

*Автору належить аналіз характеристик, розробка методів досліджень, висновки.*

55. Шевченко В. В., Дубяга Р. В. Роль атомных электростанций в электроснабжении Украины и безопасность их эксплуатации // Электрика, 2012. № 7. С. 34–39.

DOI: 10.5281/zenodo.2538505

*Автору належить обґрунтування вибору перспективних напрямків розвитку енергетики, розрахунки, висновки.*

56. Шевченко В. В., Минко А. Н., Гордиенко В. Ю. Результаты испытаний теплообменного устройства с улучшенными эксплуатационными характеристиками для турбогенераторов с воздушной системой охлаждения // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. № 14(988). С. 102-107. DOI: 10.5281/zenodo.2545473

*Автору належить розробка методів та моделей досліджень, висновки.*

57. Шевченко В. В., Дубяга С. В. Роль энергетических комплексов в решении вопроса развития энергосистем Украины // Системы обработки информации, 2013. № 2(109). С. 94-102. DOI: 10.5281/zenodo.2543706.

*Автору належить обґрунтування використання енергетичних комплексів і перспективних напрямків розвитку енергетики, висновки.*

58. Шевченко В. В. Определение критериев оценки состояния турбогенераторов для установления необходимости их замены или реабилитации // Вісник НТУ «ХПИ», 2012. № 61(967). С. 44-50. DOI: 10.5281/zenodo.2542877

59. Шевченко В. В., Лутай С. Н. Роль кризисов в динамике развития мировой энергетики и теория цикличного развития // Научные труды Донецкого нац. технического университета, 2013. № 2(15). С. 266-272. DOI: 10.5281/zenodo.2549796

*Автору належить аналіз характеристик, теоретичний аналіз, висновки.*

60. Шевченко В. В., Матвеев П. И. О целесообразности перевода турбогенераторов в режим синхронных компенсаторов // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. № 51(1024). С. 76-81. DOI: 10.5281/zenodo.2553589

*Автору належить розробка принципів, методів та моделей досліджень, висновки.*

61. Шевченко В. В., Минко А. Н., Фомина Е. М. Тепловое состояние турбогенераторов малой и средней мощности с полным воздушным охлаждением // Сборник научных трудов ХУВС им. И. Кожедуба, 2013. № 3(36). С. 173-176.

DOI: 10.5281/zenodo.2550372

*Автору належить розробка принципів та методів досліджень, висновки.*

62. Шевченко В. В., Кошевой О. П. Конструктивные особенности турбогенераторов с воздушным охлаждением // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. № 65(1038). С. 99-106. DOI: 10.5281/zenodo.2552909

*Автору належить розробка принципів, методів та моделей досліджень, висновки.*

63. Шевченко В. В., Павленко Т. П. Особенности выбора электродвигателей для технологических объектов энергоблоков АЭС // Электротехника и электромеханика, 2013. № 3. С. 36-41. DOI: 10.5281/zenodo.2544893

*Автору належить оцінка впливу режимів на показники надійності, висновки.*

64. Шевченко В. В., Минко А. Н. Анализ взаимосвязи тепловых и аэродинамических показателей охлаждающей среды с показателями массы и габаритов неактивной части конструкции турбогенератора. // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. № 51(1024). С. 59-65. DOI: 10.5281/zenodo.2553676

*Автору належить розробка принципів, методів та моделей досліджень, висновки.*

65. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Концепция выбора двигателей технологических процессов блока АЭС для обеспечения их надежности // Сборник научных трудов ХУВС им. И. Кожедуба, 2013. № 2(35). С. 161-165. DOI: 10.5281/zenodo.2544496

*Автору належить обґрунтування методів діагностики, впливу режимів на показники надійності обладнання, висновки.*

66. Шевченко В. В., Минко А. Н., Гордиенко В. Ю. Определение геометрических параметров уплотнительных узлов турбогенераторов с водородным охлаждением // Вестник НТУ «ХПИ», 2014. № 2(1055). С. 127-130. DOI: 10.5281/zenodo.2557219

*Автору належить розробка принципів та методів розрахунків, висновки.*

67. Шевченко В. В., Потоцкий Д. В. Оценка перспектив использования нанотехнологий в энергетическом электромашиностроении // Электрика, 2014. № 2. С. 13-16. DOI: 10.5281/zenodo.2557000

*Автору належить розробка теоретичних основ дослідження, висновки.*

68. Шевченко В. В. Развитие систем охлаждения турбогенераторов и теория длинных волн Кондратьева // Электрика, 2014. № 8. С. 12-15. DOI: 10.5281/zenodo.2561427

69. Шевченко В. В., Минко А. Н. Модернизация конструкций отечественных турбогенераторов с учетом требований поддержания их конкурентоспособности // Вестник НТУ «ХПИ», 2014. № 38(1081). С. 146-155. DOI: 10.5281/zenodo.2561562

*Автору належить розробка методів досліджень, розрахунки, висновки.*

70. Шевченко В. В., Милых В. И. Неисправности электрооборудования АЭС и действия оперативного персонала по их ликвидации // Электрика, 2014. № 1. С. 2-5. DOI: 10.5281/zenodo.2556400

*Автору належить розробка методів досліджень, висновки.*

71. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Оценка технических параметров турбогенераторов для определения работ по их восстановлению или установления необходимости замены // Системы вооружения и военная техника, 2015. № 2(42). С. 145-150. DOI: 10.5281/zenodo.2567462

*Автору належить розробка критеріїв оцінки стану турбогенераторів, висновки.*

72. Шевченко В. В., Масленников А. М. Структурно-логическая схема снижения массогабаритных параметров турбогенераторов // Вестник Приазовского госуд. технического университета, 2015. № 30(2). С. 137-144. DOI: 10.5281/zenodo.2573121

*Автору належить розробка схеми, висновки.*

73. Шевченко В. В. Прогнозирование эксплуатационного состояния турбогенераторов // Электрика, 2015. № 1. С. 3-7. DOI: 10.5281/zenodo.2567274

74. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Предложения по предотвращению и ликвидации поврежденных сердечников статоров турбогенераторов // Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка та енергетика, 2015. № 1(17). С. 138-43. DOI: 10.5281/zenodo.2592007

*Автору належить аналіз даних. розробка методів розрахунків, висновки.*

75. Шевченко В. В., Минко А. Н., Лукьянчикова С. А. Предложения по модернизации конструкций турбогенераторов, отработавших технический ресурс // Электрика,

2015. № 3. С. 8-13. DOI: 10.5281/zenodo.2571999

*Автору належить аналіз існуючих конструкцій та пропозицій щодо модернізації конструкцій нових турбогенераторів, висновки.*

76. Shevchenko V. V. To Issue of Ensuring of Competitiveness of Domestic Turbogenerators // Electrical and computer systems: special. release "Electrical and computer systems: theory and practice" (Odessa, 26-28 June 2016). Odessa, 2016. № 22(98). Pp. 226-231.

DOI 10.15276/eltecs.22.98.2016.38.

77. Шевченко В. В., Минко А. Н. Оптимизация массогабаритных размеров газоохладителей турбогенераторов при реконструкции и техническом перевооружении электростанций // Энергетик, 2016. № 2. С. 52-55. DOI: 10.5281/zenodo.2593848

*Автору належить проведення аналізу конструкцій турбогенераторів та розробка пропозицій щодо зниження розмірів охолоджувачів, розрахунки, висновки.*

78. Шевченко В. В. К вопросу обеспечения конкурентоспособности отечественных турбогенераторов // Электротехнические и компьютерные системы: спец. выпуск, 2016. № 22(98). С. 226-31. DOI: 10.5281/zenodo.2597120

79. Шевченко В. В., Строкоус А. В. Режимы эксплуатации турбогенераторов с учетом требований устойчивости работы энергосистемы // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2016. № 2(145). С. 33-42. DOI: 10.5281/zenodo.2595892

*Автору належить розробка принципів забезпечення режимів надійності роботи турбогенераторів, висновки.*

80. Шевченко В. В., Минко А. Н. Комплексная структура разработки турбогенераторной установки блочно-модульного исполнения // Вестник НТУ «ХПИ», 2017. № 9(1231). С. 86-89. DOI: 10.20998/2078-774X.2017.09.14

*Автору належить розробка конструкцій та методів розрахунків, висновки.*

81. Шевченко В. В., Минко А. Н., Потоцкий Д. В. Рекомендации по компоновке и выбору основного энергетического оборудования теплоутилизационных электрических станций блочно-модульного исполнения // Электротехнічні та комп'ютерні системи, 2017. № 26(102). С. 18-24. DOI: 10.5281/zenodo.2233302

*Автору належить розробка принципів та методів компоновки енергетичного обладнання, висновки.*

82. Шевченко В. В., Шайда В. П., Зубань Е. С. Особенности выбора материалов магнитных систем электродвигателей для авиации // Наука и техника Воздушных Вооруженных сил Украины, 2017. № 2(27). С. 59-64. DOI: 10.30748/nitps.2017.27.11

*Автору належить розробка програми досліджень, порівняння результатів, висновки.*

83. Шевченко В. В., Потоцкий Д. В., Строкоус А. В. Особенности эксплуатации и диагностики турбогенераторов в состоянии износа // Fundamentalis scientiam (Spain, Madrid), 2017. № 2(3). С. 87-94. DOI: 10.5281/zenodo.2599756

*Автору належить розробка положень щодо особливостей експлуатації електрообладнання в стані зносу, висновки.*

84. Шевченко В. В., Потоцкий Д. В. Использование асинхронизированных турбогенераторов для стабилизации напряжения в энергосистеме // Системы вооружения и военная техника Харьковского университета воздушных сил им. И. Кожедуба, 2017. № 1(49). С. 181-184. DOI: 10.5281/zenodo.2602013

*Автору належить розробка положень щодо використання АСТГ на ТЕС, висновки.*

85. Шевченко В. В., Строкоус А. В. Прогнозирование эксплуатационного ресурса турбогенераторов по данным вибрационного контроля // Norwegian Journal of Development of the International Science, 2017. № 10. Т. 2. Рр. 78-83.

DOI: 10.5281/zenodo.2602132

*Автору належить розробка методів аналізу експлуатаційної інформації, розробка методів дослідження, розрахунки, висновки.*

86. Шевченко В. В. Визначення впливу повздовжніх коливань турбогенераторів на їх надійність // Вісник Харківського НТУ сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки, 2019. № 203 С. 85-87. DOI: 10.5281/zenodo.3526670

87. Шевченко В. В., Петренко Н. Я. О повышении надежности работы автоматических установок пожаротушения на блоках АЭС // Вестник Донбасской госуд. машиностроительной академии, 2019. № 45(1). С. 181-187. DOI: 10.5281/zenodo.3605150

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів на блоках АЕС, розробка і оцінка ефективності схем пожеже тушіння, висновки.*

88. Шевченко В. В., Лизан И. Я. Обзор перспективных направлений энергосбережения в электромашиностроении // Труды Луганского отделения международной академии информатизации, 2009. № 1(18). С. 104-109. DOI: 10.5281/zenodo.2528910

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів на сучасну енергосистему, пропозиції щодо підвищення ефективності роботи ТГ, висновки.*

89. Свідоцтво про реєстрацію авторського права Державного департаменту інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України на твір "Комп'ютерна програма «Fahrenheit v.0.1» № 39709 від 16.08.2011 р. / В. В. Шевченко, В. В. Кузьмін, О. М. Мінко, В. Ю. Гордієнко (Україна). DOI: 10.5281/zenodo.2532938

*Автору належить розробка теоретичних основ визначення і розрахунків втрат.*

90. Шевченко В. В., Мінко О. М., Кобзар К. О., Гордієнко В. Ю. Теплообмінник потужних електричних машин: пат. № 73346 від 25.09.2012 (власник: ДП «Завод «Електроважмаш», Україна). Патенти і винаходи (Державна служба інтелектуальної власності України, Укрпатент), 2012. Бюл. № 8. 7 с. DOI: 10.5281/zenodo.2536048

*Автору належить розробка алгоритму розрахунку теплового стану ТГ.*

91. Шевченко В. В., Гордієнко В. Ю., Грубой О. П., Мінко О. М. Вузол еластичного кріплення зовнішніх опорних лап: Патент на корисну модель № 86743 від 10 Січ 2014, заяв. № u 2013 08457 від 05 Лип 2013 (власник ДП «Завод «Електроважмаш», Україна). Патенти і винаходи (Державна служба інтелектуальної власності України, ДП «Український інститут промислової власності»), 2014;(1). 6 с.

DOI: 10.5281/zenodo.2557032

*Автору належить огляд конструкцій опорних лап ТГ, їх механічні розрахунки.*

92. Шевченко В. В., Мінко О. М., Гордієнко В. Ю., Грубой О. П. Маслоуловлювач потужних електричних машин. Патент на винахід № 113647. Видано відповідно Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі». Зареєстроване в Держ. реєстрі патентів України на винаходи 27.02.2017 р., № заяви а 2014 13100. Публікація відомостей про видачу патенту 27.02.2017, бюл. № 4. 6 с.

*Автору належить пропозиції щодо компоновки маслоуловлювача.*

93. Шевченко В. В., Мінко О. М. Рекуператор: Патент на корисну модель № 127443 від 25.07.2018, заявка № u 2018 03534 від 02.04.2018. Патенти і винаходи (Держ. служба інтелектуальної власності України, ДП "Український інститут промислової власності"), 2018;(14). 6 с. DOI: 10.5281/zenodo.2636354.

*Автору належить пропозиції щодо компоновки рекуператора при різних напрямках руху охолоджуючого середовища.*

94. Шевченко В. В., Мінко О. М. Теплоутилізаційна електрична станція: Патент на корисну модель № 135396 від 25.06.2019, заявка № u 2019 01105 від 04.02.2019. Патенти і винаходи (Державна служба інтелектуальної власності України, ДП «Український інститут промислової власності»), 2019, бюл. № 12. 4 с. DOI: 10.5281/zenodo.3605638. 7 с.

*Автору належить пропозиції щодо компоновки конденсаційного блоку.*

95. Шевченко В. В., Лизан И. Я., Зиновьев С. Н. Ядерная энергетика Украины и экологическая безопасность: проблемы и перспективы. *Современные аспекты механизации и автоматизации энергоемких производств*: сбор. материалов Междунар. научно-практ. конф. «Современные аспекты механизации и автоматизации энергоемких производств» (г. Красноармейск, 28-29 апреля 2011 г.). Красноармейск, 2011. С. 288-296. DOI: 10.5281/zenodo.2530962

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів АЕС в сучасних умовах, розробка пропозицій щодо підвищення їх ефективності, висновки.*

96. Шевченко В. В., Омельченко Л. Н. Энергосбережение в энергосистемах // Мир Техники и Технологий. Международный промышленный журнал, 2012. № 5(126). С. 52-55. DOI: 10.5281/zenodo.2538496

*Автору належить обґрунтування вибору перспективних напрямків розвитку енергетики, методів діагностики електрообладнання, ТГ, висновки.*

97. Шевченко В. В. Экология и атомная энергетика Украины // Мир Техники и Технологий. Международный промышленный журнал, 2012. № 7(128). С. 30-33. DOI: 10.5281/zenodo.2538639

98. Шевченко В. В. Управляемые источники реактивной мощности, как способ повышения надежности работы энергосистем. *Современные тенденции ТООР. Диагностика оборудования горно-металлургического и энергетического комплексов*: сбор. тезисов докладов междунар. научно-практ. конференции, (г. Мариуполь, 9-10 сент. 2013 г.). Мариуполь, 2013. С. 60-62. DOI: 10.5281/zenodo.2551556

99. Шевченко В. В. Направления деятельности по обеспечению энергоэффективности энергетики // Мир Техники и Технологий. Международный промышленный журнал, 2013. № 5(138). С. 26-35.

DOI: 10.5281/zenodo.2549844

100. Шевченко В. В., Минко А. Н. Критерий оптимизации массогабаритных параметров конструкций турбогенераторов. *Инновационные технологии в электроэнергетике и электромеханике*: сбор. научно-техн. трудов междунар. научно-техн. конф. НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий». Воронеж, 2013. С. 138-142. DOI: 10.5281/zenodo.2545647

*Автору належить аналіз конструкцій ТГ, оцінка питомих показників, висновки*

101. Шевченко В. В. Определение сил, действующих в сердечнике статора турбогенератора. *Электроэнергетика и электромеханика*: сбор. научно-техн. трудов междунар. научно-техн. конф. НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий», (г. Воронеж, 22 апреля 2015 г.). Воронеж, 2015. С. 52-56.

DOI: 10.5281/zenodo.2579270

102. Шевченко В. В., Потоцкий Д. В. Использование сверхпроводников в электромашиностроении как фактор энергосбережения. *Электроэнергетика и электромеханика*: сбор. научно-техн. трудов междунар. научно-техн. конф. НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий». Воронеж, 2014. № 1. С. 142-146.

DOI: 10.5281/zenodo.2561278

*Автору належить аналіз конструкцій ТГ з надпровідниковими обмотками, оцінка їх роботи, пропозиції щодо використання, висновки.*

103. Шевченко В. В., Петренко Н. Я. Роль энергоэффективности электрооборудования электростанций в поддержании баланса активной и реактивной мощности в системе. *Актуальные научные исследования в современном мире (iScience)*: сбор. научно-техн. трудов междунар. научно-техн. конф., (г. Переяслав-Хмельницкий, 26-27 февр. 2018 г.). Переяслав-Хмельницкий, 2018. № 2(34). Т. 6. С. 131-136.

DOI: 10.5281/zenodo.2221971.

*Автору належить встановлення проблем сучасних електромереж, пропозицій щодо підтримки балансу активної а реактивної потужностей, висновки.*

104. Shevchenko V. V., Minko A. N. Turbogenerators of New Generation with Various Cooling Systems. *Problems of modern power engineering and automation in the system nature management (theory, practice, history, education)*: proceedings of the VII International Scientific-Technical Conference, Sect. 5 "Electromechanical transformation of energy" (Kyiv, May 23-27, 2018). Kyiv, 2018. С. 90-92. DOI: 10.5281/zenodo.2636460

*Автору належить розробка принципів та методів розрахунків систем охолодження сучасних ТГ, порівняння характеристик агентів охолодження, висновки.*

105. Shevchenko V. V., Semenyutin D. G. Modeling of the Temperature State of Turbogenerators in the Medium of SolidWorks. *Problems of modern power engineering and automation in the system nature management (theory, practice, history, education)*: Proceedings of the VII International Scientific-Technical Conference, Sect. 5 "Electromechanical transformation of energy" (Kyiv, May 23-27, 2018). Kyiv, 2018. С. 84-86.

DOI: 10.5281/zenodo.2636622

*Автору належить розробка математичної моделі та аналіз моделювання розподілу температури сучасних турбогенераторів, висновки.*

106. Шевченко В. В. Соотношение технического и человеческого фактора в вы-

полнении задачи безопасного продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины // Международный электронный научно-практ. журнал «Way Science», 2018. № 2(2). С. 114-138. DOI: 10.5281/zenodo.2196905

107. Шевченко В. В., Дон А. В., Кононова Т. Г. Проблемы современной электроэнергетики, пути ее развития и оценка источников электроэнергии // *Science and Society: collection of works XVI International Scientific Conference (Canada, Hamilton, Dec 27, 2019)*. Hamilton, 2019. Pp. 61-73. DOI: 10.5281/zenodo.3892964

*Автору належить аналіз проблем сучасної електроенергетики, прогнозування напрямків її розвитку, висновки.*

108. Шевченко В. В., Шевченко А. С. Выбор параметров медицинского контроля физического состояния операторов АЭС // Вестник Харьковского регион. института проблем общественного здравоохранения, 2018. № 6(86). С. 41-44. DOI: 10.5281/zenodo.2538243

*Автору належить вивчення особливостей діагностування електрообладнання в стадії зносу, встановлення кількості додаткових датчиків контролю.*

109. Шевченко В. В., Бредун А. В. Программное обеспечение для АЭС как часть их безопасной работы // Вестник Харьковского регионального института проблем общественного здравоохранения, 2019. № 1(87). С. 8-15.

DOI: 10.5281/zenodo.2540739

*Автору належить вивчення особливостей діагностування електрообладнання на блоках АЕС, встановлення кількості додаткових датчиків контролю, висновки.*

110. Shevchenko V. V., Shevchenko A. S., Sergiyenko I. V. Proposals for Reducing the Accident Rate on Nuclear Power Plants and Minimizing of Accident Consequences // *Bulletin KhRIPHS*, 2019. № 2(88). С. 31-43. DOI: 10.5281/zenodo.2596459

*Автору належить вивчення особливостей діагностування електрообладнання, яке знаходиться в тривалій експлуатації, встановлення необхідної кількості додаткових датчиків контролю, висновки.*

111. Шевченко В. В. Особенности преподавания технических дисциплин при современной речевой подготовке студентов. *Современные проблемы многоуровневого образования: сб. трудов VIII Междунар. научно-метод. симпозиума, (Краснодарский край, пос. Дивноморское, 27 сент. - 4 окт. 2013)*. Ростов-на-Дону, 2013. С. 206-214. DOI: 10.5281/zenodo.2552676

112. Шевченко В. В., Кононова Т. Г. Виды дефектов и расчет ущербов от отказов турбогенераторов на блоках электростанций // Сучасний рух науки. Міжнародний науково-практичний журнал «Way Science», 2019. № 3. С. 634-638.

DOI: 10.5281/zenodo.3491058

*Автору належить встановлення особливостей роботи турбогенераторів в стадії зносу, розрахунки збитків від відмов ТГ, висновки.*

113. Шевченко В. В., Дон А. В. Предложения по продлению срока эксплуатации электрооборудования электростанций // Сучасний рух науки: Міжнародний науково-практичний журнал «Way Science», 2019. № 3. С. 629-633. DOI: 10.5281/zenodo.3491167

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів в стадії зно-*

су, розробка пропозицій щодо подовження строку експлуатації, розрахунки, висновки.

114. Шевченко В. В., Петренко Н. Я. Перспективы развития и проблемы атомной энергетики Украины // Сучасний рух науки. Міжнародний науково-практичний журнал «Way Science», 2019. № 3. С. 638-644. DOI: 10.5281/zenodo.3497554.

*Автору належить вивчення особливостей роботи турбогенераторів АЕС з урахуванням сучасного стану електричних мереж, розрахунки, висновки.*

115. Шевченко В. В., Петренко М. Я., Шевченко О. С. «Зелений тариф» в електроенергетиці України. Соціальна справедливість, економіка та міжнародне право. *Новітні технології в освіті, науці та виробництві*: збір. матеріалів II міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., (м. Покровськ 2020 р.). Покровськ, 2020. С. 71-74.

DOI:10.5281/zenodo.3950337

*Автору належить проведення аналізу і проблем внеску в загальну енергосистему України енергії від відновлюємих джерел, перспектив їх використання, висновки.*

## АНОТАЦІЇ

**Науково-технічні засади підтримки конкурентоспроможності турбогенераторів і забезпечення їхньої ефективної роботи при тривалій експлуатації. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук. Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати. – Кафедра електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2020.

Дисертація присвячена науково-прикладній проблемі забезпечення надійної роботи сучасних ТГ на блоках ТЕС і АЕС, дослідженню особливостей роботи ТГ, які протягом тривалого часу перебувають в експлуатації, продовженню термінів їх експлуатації, підвищенню конкурентоспроможності нових ТГ на світовому ринку. Розроблені наукові концепції, що підтверджують перспективність виконання робіт з вдосконалення ТГ з урахуванням загальносвітових екологічних проблем, активного розвитку і значною державної підтримки відновлюваних джерел енергії. З використанням теорії циклічного розвитку встановлено, що для України є перспективним стабілізаційне-стагнаційний сценарій, який передбачає подальше вдосконалення і розвиток теплової електроенергетики (ТЕС і АЕС), вдосконалення і підвищення потужності ТГ. Проведено комплекс досліджень щодо вдосконалення ТГ: підвищення потужності в одиниці виконання, зниження їх масогабаритних показників, вдосконалення систем охолодження, використання нових технологій і матеріалів. Складена структурно-логічна схема виконання робіт з підтримки науково-технічної конкурентоспроможності вітчизняних ТГ з урахуванням технічного рівня заводу-виробника і технічних можливостей супутніх галузей в напрямках зменшення питомої маси ТГ, заміни водневої системи охолодження на повітряну, збільшення потужності нових ТГ в одиниці виконання і потужності ТГ, що вже працюють на блоках електростанцій, без зміни габаритів. Доведено необхідність під час визначення черговості включення ТГ в енергосистему враховувати не тільки собівартість електроенергії, але і дані їх стану, а також те, що підтримувати номінальні параметри енергосистеми України доцільно турбогенераторами потужністю 200-300 МВт, встановленими на ТЕС, і використання для такого регулювання

турбогенераторів АЕС неприпустимо. Виконано порівняння і показано наскільки і чому вітчизняні ТГ поступаються за питомою масою ТГ провідних світових фірм, чому вони важче зарубіжних аналогів. Вирішення цих питань дозволяє підвищити надійність ТГ, які тривалий час в експлуатації, і дозволяє впроваджувати перспективні рішення для підтримки конкурентоспроможності вітчизняних ТГ на світовому ринку. Запропонована методика комплексного системного контролю стану ТГ в період тривалої експлуатації з урахуванням особливостей режимів роботи енергетичних мереж і переході до проведення ремонтів по фактичному стану, а не за графіком планово-попереджувальних ремонтів. Запропоновані і обґрунтовані напрями зниження масогабаритних показників ТГ шляхом використання більш перспективних технологій, стандартних профілів і нових матеріалів при проведенні робіт з вдосконалення їх неактивної зони. Проаналізоване розвиток, стан і перспективи підвищення надійності систем охолодження, запропоновані напрями створення і діагностики сучасних охолоджувачів. Розроблено та науково обґрунтований метод контролю стану ТГ в режимі *on-line*, запропоновано вважати найбільш інформативним показником рівень вібрації, що скорочує необхідну додаткову кількість каналів контролю і знижує навантаження на операторів блоків електростанцій. Отримані в роботі наукові результати базуються на експериментальних даних, що були отримані при сервісному обслуговуванні і проведенні ремонтів ТГ на блоках електростанцій України та інших країн. Розглянуті проблеми і запропоновані напрями поліпшення професійної підготовки робітників ТЕС і АЕС, визначені шляхи підвищення їхньої економічної зацікавленості для утримання в національній електроенергетиці.

**Ключові слова:** турбогенератор, електроенергетика, циклічність розвитку, тривала експлуатація, конкурентоспроможність, енерго- і ресурсозбереження, енергоефективна технологія, система контролю і діагностики, підвищення потужності, масогабаритні показники, екологічна безпека, людський фактор

**Научно-технические основы поддержания конкурентоспособности турбогенераторов и обеспечение их эффективной работы при длительной эксплуатации. – На правах рукописи**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – Кафедра электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2020.

Диссертация посвящена научно-прикладной проблеме обеспечения надежной работы современных ТГ на блоках ТЭС и АЭС, исследованиям особенностей работы ТГ, которые долго находятся в эксплуатации, продлению сроков их эксплуатации, повышению конкурентоспособности новых ТГ на мировом рынке. Разработаны технические и технологические мероприятия по повышению энергоэффективности новых ТГ и ТГ, которые длительное время находятся в эксплуатации, обеспечению их эффективной работы при длительной эксплуатации с учетом особенностей работы на современную энергосистему, по поддержке научно-технической конкурентоспособности новых ТГ.

Разработаны научные концепции, подтверждающие перспективность выполнения

работ по совершенствованию ТГ с учетом общемировых экологических проблем, активного развития и значительной государственной поддержки возобновляемых источников энергии. С использованием теории циклического развития установлено, что для Украины возможен и перспективен стабилизационно-стагнационный сценарий, при котором предполагается дальнейшее совершенствования и развитие тепловой электроэнергетики (ТЭС и АЭС), совершенствование и повышение мощности ТГ. Дано обоснованное подтверждение перспективности исследований ТГ, как основных источников электроэнергии в отечественной энергосистеме в настоящее время и еще достаточно долго в будущем. Установлено, что необходимость проведения работ по совершенствованию ТГ повышается с развитием рыночных отношений в электроэнергетике.

Проведен комплекс исследований по совершенствованию ТГ: повышение мощности в единице исполнения, снижение их массогабаритных показателей, совершенствование систем охлаждения, использование новых технологий и материалов. Составлена структурно-логическая схема выполнения работ по поддержке научно-технической конкурентоспособности отечественных ТГ с учетом технического уровня завода-изготовителя и технических возможностей сопутствующих отраслей в направлениях уменьшения удельной массы ТГ, замены водородной системы охлаждения на воздушную, увеличение мощности новых ТГ в единице исполнения и мощности ТГ, уже работающих на блоках электростанций, без изменения габаритов. Доказана необходимость при определении очередности включения ТГ в энергосистему учитывать не только себестоимость электроэнергии, но и данные по их состоянию, а также то, что поддерживать номинальные параметры энергосистемы Украины целесообразно турбогенераторами мощностью 200-300 МВт, установленными на ТЭС, и использование для такого регулирования турбогенераторов АЭС недопустимо. Выполнено сравнение и показано насколько и почему отечественные ТГ уступают по удельной массе ТГ ведущих мировых фирм, почему они тяжелее зарубежных аналогов. Предложено для уменьшения этого показателя использовать максимально возможную унификацию элементов и узлов ТГ, стандартные профили, современные материалы и технологии. Сделан вывод, что при выполнении работ по уменьшению удельной массы отдельных элементов ТГ, наиболее перспективным является геометрическое моделирование с использованием возможностей современных компьютерных технологий и системного подхода. Предложено, как показатель технического совершенства производства ТГ, использовать общий коэффициент технологической оснащенности и частичные КТО из разных видов технологической оснастки. Доказано, что значение КТО является показателем, позволяющим сравнивать технический уровень отечественных предприятий турбогенераторобудованья с предприятиями других стран, предложена методика расчета показателей динамики прироста комплексного показателя унификации, подтверждающий действенность выполненных приемов по снижению удельной массы ТГ. Предложены и обоснованы направления снижения массогабаритных показателей ТГ за счет совершенствования их неактивной зоны путем использования более перспективных технологий, стандартных профилей и новых материалов.

Выполнено сравнение массовых показателей корпусов ТГ с водородным и воздушным охлаждением, предложенные изменения в конструкции неактивной зоны ТГ при переходе к воздушному охлаждению. Составлена схема проектирования ТГ с воз-

душным охлаждением при обеспечении требования снижения массогабаритных параметров ТГ по четырем основным направлениям: техническое, управленческое-кадровое, материально-снабженческое и технологическое, - которые следует учитывать при снижении массогабаритных показателей ТГ. Предложена методика механического расчета элементов и узлов ТГ, для которых планируются изменения при снижении удельного веса. С использованием этой методики проведения выбор рациональных форм стандартных профилей для элементов конструкции ТГ при сложных нагрузках. Предложено считать критерием допустимого снижения сечений элементов конструкций неактивной зоны ТГ удельный момент сопротивления при воздействии нормальных и касательных напряжений (при расчетах использовалась гипотеза плоских сечений Бернулли и теория естественно закрученных стержней Кирхгофа-Клебша). Предложено использовать для нагруженных элементов неактивной зоны ТГ композиционные материалы. Показана возможность повышения мощности ТГ от 300 до 500 МВт без изменения габаритов; установлено на сколько суммарные масса, стоимость и потери мощности нескольких ТГ больше массы, стоимости и потерь мощности одного ТГ той же суммарной мощности (в  $\sqrt[4]{m}$ , где  $m$  – количество ТГ меньшей мощности). Без создания физической модели, с помощью моделирования с использованием компьютерных программ получены данные теплового и механического состояния модернизированных элементов ТГ; проведено исследование влияния скорости изменения нагрузки на степень деформации стержней обмоток и на состояние изоляции установлена допустимая скорость повышения нагрузки ТГ. Рассчитан перепад температуры по толщине изоляции ТГ, определено влияние этого перепада на надежность изоляции. Это позволило утверждать, что увеличение мощности ТГ за счет повышения напряжения более, чем до 27 кВ, при использовании современных видов изоляции бесперспективно. Предложена методика расчета дополнительных сил, действующих между листами шихтованного сердечника статора. Сделан вывод, что эти дополнительные силы могут объяснить разрушения не только торцевых, но и центральных пакетов сердечника. Исследовано влияние состояния шихтованными сердечников, схемы их сборки, уровня и качества опрессовки на эксплуатационную надежность и долговечность ТГ; предложена методика вычисления относительного скольжения листов, оценки влияния износоустойчивости лакового покрытия на длительность эксплуатации. Составлена программа проведения диагностики и ремонта газоохладителей на блоках ТЭС и причины отказа новых охладителей. Предложена методика расчета распределения температуры по теплообменной поверхности трубок охладителя и интенсивности теплоотвода в зависимости от количества трубок, их вида, компоновки и количества ходов. Предложена методика комплексного системного контроля состояния ТГ в период длительной эксплуатации с учетом особенностей режимов работы энергетических сетей и при переходе к проведению ремонтов по фактическому состоянию, а не по графику планово-предупредительных ремонтов. Проанализировано развитие, состояние и перспективы повышения надежности систем охлаждения, предложены направления создания и диагностики современных охладителей. Разработан и научно обоснован метод контроля состояния ТГ в режиме *on-line*, предложено считать наиболее информативным показателем уровень вибрации, что сокращает необходимое дополнительное количество каналов контроля и снижает нагрузку на операторов блоков электростанций, что наибо-

лее важно в период перехода к обслуживанию по фактическому состоянию. Полученные в работе научные результаты базируются на экспериментальных данных, полученных при сервисном обслуживании и проведении ремонтов ТГ на блоках электростанций Украины и других стран. Проведены исследования влияния «человеческого фактора» на надежность работы ТГ. Доказана необходимость расширения программы профессиональной подготовки и переподготовки персонала станций, определены пути повышения их экономической заинтересованности для удержания в национальной электроэнергетике. Показано, что к причинам отставания от зарубежных фирм, кроме устаревших технологий, следует отнести отсутствие финансирования исследований новой техники и поддержки научных проектов; низкий уровень финансирования и профессиональной направленности образовательных программ.

**Ключевые слова:** турбогенератор, электроэнергетика, цикличность развития, длительная эксплуатация, конкурентоспособность, энерго- и ресурсосбережение, энергоэффективная технология, система контроля и диагностики, повышение мощности, массогабаритные показатели, экологическая безопасность, человеческий фактор.

**Shevchenko V.V. Scientific and Technical Fundamentals of Maintaining the Competitiveness of Turbogenerators and Ensuring their Efficiency During Long-term Operation. - As a manuscript**

The thesis is submitted for the academic degree of doctor of technical sciences.

Specialty 05.09.01 – Electrical machines and apparatuses. – Department of Electrical Machines of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov, 2020.

The dissertation is devoted to the scientific and applied problem of ensuring reliable operation of modern turbogenerators (TG) at thermal and nuclear power plants (TPP and NPP) units, research of TG features, which are in operation for a long time, extension of their operation, increasing the competitiveness of new TG on the world market. Scientific concepts have been developed that confirm the prospects for the implementation of work to improve TG, taking into account global environmental problems, active development and significant government support for renewable energy sources. Using the theory of cyclical development, it is established that for Ukraine is a promising stabilization and stagnation scenario, which provides for further improvement and development of thermal power plants (TPP and NPP), improvement and increase of TG capacity. A set of studies was carried out to improve the TG: increase of capacity in unit of execution, decrease in their mass and size indicators, improvement of cooling systems, use of new technologies and materials. Taking into account the technical level of the manufacturer and the technical capabilities of related industries, a structural and logical scheme of work to maintain scientific and technical competitiveness of domestic TGs was drawn up. The research was performed to reduce the specific weight of TG, to replace the hydrogen cooling system with air, to increase the capacity of new TG and TG already operating at power plants. At the same time there was a requirement to preserve the dimensions.

Proven need to take into account not only the cost of electricity, but also data on their condition in determining the order of inclusion of TG in the power system. It is proved that it is expedient to maintain the nominal parameters of the power system of Ukraine with turbo-

generators with a capacity of 200-300 MW, which are installed at thermal power plants. The use of NPP turbogenerators for such regulation is unacceptable. A comparison is made and it is shown to what extent and why domestic turbogenerators are inferior in specific weight to TGs of the world's leading companies, why they are heavier than foreign counterparts. The decision of these questions allows to increase TG reliability which are in operation for a long time, allows to implement perspective decisions for maintenance of competitiveness of domestic TGs in the world market. A method of complex system monitoring of turbogenerators, which have been operating at power plants for a long time, was proposed. The method took into account the peculiarities of the turbogenerators on the modern power grid and the transition to repairs on the actual condition, rather than on the schedule of planned and preventive repairs. The directions of reduction of mass-dimensional indicators of turbogenerators by means of improvement of their inactive zone are offered and proved. To do this, it is proposed to use more promising technologies, standard profiles and new materials. The development, condition and prospects of increase of reliability of cooling systems are analyzed; the directions of creation and diagnostics of modern coolers are offered. Developed and scientifically substantiated method of monitoring the state of TG in the on-line mode; it is proposed to consider the level of vibration as the most informative indicator; this reduces the required additional number of control channels and reduces the load on power plant operators. The scientific results obtained in this work are based on experimental data obtained during service and repairs of turbogenerators at power plants in Ukraine and other countries. Problems are considered and directions of improvement of professional training of workers of TPP and NPP are offered, ways of increase of their economic interest for maintenance in the national electric power industry are defined.

**Key words:** turbogenerator, electric power industry, cyclical development, long-term operation, competitiveness, energy and resource saving, energy efficient technology, monitoring and diagnostic system, power increase, weight and size indicators, ecological safety, human factor.



Відповідальний за випуск  
д. т. н., проф., вчений секретар НТУ «ХП»  
Заковоротний О. Ю.

Підписано до друку 21.10.2020 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетн. Друк – цифровий. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. – 1,45. Наклад 140 прим. Замовлення № \_\_\_\_\_

Віддруковано в ТОВ «Друкарня МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Гуданова 18  
Тел.: (057) 756-53-25  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи,  
Серія ДК, № 4399 від 27.08.2012 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)