

**К. О. КОБЗАР, О. В. ТРЕТЯК, О. Ю. ШУТЬ, В. Р. ПОЛІЄНКО, П. Г. ГАКАЛ, Є. С. П'ЯТНИЦЬКА**

## **РОЗРОБЛЕННЯ Й ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ТА ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС**

Вперше в Україні (не має аналогів) на світовому рівні з використанням розробленої методики проведено розрахункові дослідження з проектування й моделювання потужних турбо- та гідрогенераторів. Це дозволило створити енергетичні установки нового покоління з показниками ефективності та надійності, які відповідають світовим вимогам, що пред'являються до енергетичного устаткування. Побудовано турбогенератор ТГВ-550-2МУ3 та розроблено технічні умови для його впровадження на Екібастузській ДРЕС. Спроектовано та розроблено гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4 з метою впровадження на Дністровській ГАЕС.

**Ключові слова:** турбогенератор, бандажне кільце ротору, торсійний вал, втомне руйнування, складнонапружений стан, моделювання, субмікро- і мікротріщина, міцність

Впервые в Украине (не имеет аналогов) на мировом уровне с использованием разработанной методики проведены расчетные исследования по проектированию и моделированию мощных турбо- и гидрогенераторов. Это позволило создать энергетические установки нового поколения с показателями эффективности и надежности, которые соответствуют мировым требованиям, которые предъявляются к энергетическому оборудованию. Построено турбогенератор ТГВ-550-2МУ3 и разработаны технические условия для его внедрения на Экибастузской ГРЭС. Спроектировано и разработано гидрогенератор-двигатель СВО2-1255 / 255-40 УХЛ4 с целью внедрения на Днестровской ГАЭС.

**Ключевые слова:** турбогенератор, бандажное кольцо ротора, торсионный вал, усталостное разрушение, сложнонапряженное состояние, моделирование, субмикро- и микротрещина, прочность.

For the first time in Ukraine (there is no analogues) at the world level, using the designed methods, calculation researches were carried out on designing and simulation of high power Turbogenerators and Hydrogenerators. This let design power plants of a new generation with indices of efficiency and reliability that meet the world requirements that are submitted to the power equipment.

Turbogenerator TGV-550-2MU3 (rated 550 MW) was manufactured and technical specifications for its put in to operation at Ekibastuzskaia SDPP were designed. In accordance with the requirements of GOST 533-2000 for Turbogenerators rated over 350 MW mean time between failures comprises 18000 h., that corresponds to complete specified service life of 40 years. Given condition in the complete scope is provided for Turbogenerator TGV-550-2MU3, the stand tests were carried out successfully.

Hydrogenerator-Motor SVO2-1255 / 255-40 UHL4 (power in the generator mode is of 324 MW, power of the motor is of 416 MW) was designed with the purpose of put in to practice at Dniestrovskaya HPSP. Taking in to consideration the necessity of trouble-free operation of the hydroaggregate during long term at provision of peak loads of the electric power net for all the parts the calculations of complex stressed state which let develop the design corresponding to the best world standards were carried out.

Designed Turbogenerators and Hydrogenerators give possibility to expand the export opportunities of the power enterprises of our state, which makes a significant contribution in to the economic development of the country.

**Keywords:** Turbogenerator, the retaining ring of the rotor, the torsion shaft, fatigue distorsion, complex stressed state, simulation, submicro- and micro crack, strength.

**Вступ.** Однією з найважливіших складових добробуту громадян є повне, надійне та екологічно безпечне забезпечення потреб суспільства теплом, електроенергією та іншими енергетичними продуктами. Значна частина споживання паливно-енергетичних ресурсів припадає на теплові електричні станції (ТЕС) та теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що виробляють електричну та теплову енергію.

Проведений аналіз технічного стану турбогенераторного обладнання України показує, що більшість турбогенераторів ТЕС відпрацювали свій термін служби. Конструкції турбо- та гідрогенераторів є застарілими, а технічний стан вже не відповідає сучасним вимогам з ефективності, надійності та маневреності. Наразі, внаслідок гострої необхідності приведення показників обладнання до Європейських норм, у зв'язку з майбутньою інтеграцією об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України до Європейської енергетичної системи (ЄЕС), є велика потреба в модернізації існуючих та створенні нових високоекономічних турбогенераторів.

Через вищезазначену причину створення нових високоефективних типів турбо- та гідрогенераторів, впровадження комплексу заходів з модернізації діючого обладнання, направлених на доведення показників турбогенераторів до сучасних вимог, водночас зі збільшенням їх потужності та

перевантажувальної здатності, є надзвичайно сучасними і важливими задачами.

Відповідно до енергетичної програми України на період до 2030 року споживання електроенергії в Україні повинно досягти 395,1 млрд. кВт·годин при її виробництві усіма видами електричних станцій – 420,1 млрд. кВт·годин (базовий сценарій). При цьому теплові електростанції мають виробляти 180,4 млрд. кВт·годин електроенергії, що потребує встановлення генеруючих потужностей 46,4 млн. кВт, або 52,43 % від загальної потужності електростанцій, яка сягає 88,5 млн. кВт.

Таким чином, для забезпечення економіки України електричними потужностями у запланованому обсязі до 2030 року необхідно не тільки провести оновлення нині діючих великих ТЕС, ТЕЦ ГЕС, але й додатково побудувати електростанції загальною встановленою потужністю генеруючого обладнання не меншою 17,8 млн. кВт, тобто для нових електростанцій необхідно виготовити обладнання приблизно для 60-ти енергоблоків потужністю по 300 МВт. Для забезпечення сучасних вимог з надійності та маневреності, стійкого і ефективного функціонування ОЕС України, беручи до уваги умови з інтеграції енергосистеми України до ЄЕС та забезпечення вимог УСТЕ, необхідно також проведення науково-дослідних та проектних робіт.

Крім того, треба зважати на обставини, що 46 % електроенергії в Україні виробляється на АЕС, які повинні працювати в базовому режимі, а потужностей ГЕС та ГАЕС, що працюють в регулюючому режимі, недостатньо (9 % від встановлених потужностей всіх електростанцій України). Тому в сучасній ситуації не тільки газомазутні блоки, але й вугільні повинні брати участь у регулюванні частоти та потужності ОЕС України, що істотно впливає на ресурс теплових енергоблоків й може призвести до виходу їх з ладу раніше запланованого терміну.

Понад 80 % потужностей ТЕС України укомплектовано турбогенераторами виробництва харківського ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», і на переважній більшості енергоблоків експлуатуються турбогенератори потужністю 200–300 МВт. Також підприємство має великий досвід проектування та виробництва гідрогенераторів великої та малої потужності, саме тому ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» слідує за новітніми тенденціями розвитку турбо- та гідрогенераторобудування й разом з науково-дослідними організаціями України проводить наукові дослідження з метою розроблення і впровадження інноваційних технологій у виробництво для підвищення конкурентоздатності своєї продукції на світовому ринку.

Зважаючи на об'єктивні причини турбогенератори ТЕС ще довгий час будуть використовуватись для покриття пікових і напівпікових навантажень, забезпечуючи базовий режим роботи АЕС. Ця обставина потребує нового підходу до проблеми модернізації діючих турбогенераторів та проектування їх удосконалених зразків, що, в свою чергу, ставить задачу поглиблення досліджень в області моделювання електричних машин, термодинамічних процесів, розрахунку магнітних і температурних полів.

Важливим питанням при експорті електроенергії до європейських країн є розв'язання проблеми високої стійкості турбогенераторів при роботі на довгі лінії електропередач, забезпечуючи режими глибокого споживання реактивної потужності. Для цього необхідно продовжувати роботи з дослідження процесів у скінченних частинах турбогенераторів та розробці заходів з підвищення надійності елементів конструкції при проектуванні та модернізації турбогенераторів шляхом впровадження власно розроблених інноваційних технологій.

Колективом авторів розроблено методику та проведено розрахункові дослідження теплового стану потужних турбо- та гідрогенераторів за допомогою ліцензованого програмного комплексу SolidWorks Simulation, що дозволило створити потужні генератори нового поліття з підвищеними показниками надійності, довговічності та ремонтпридатності. Це забезпечує високу економічність, надійність та маневреність електрогенеруючого устаткування, дає можливість розв'язувати проблему оновлювання турбогенераторного парку України та розширює експортні можливості енергопідприємств нашої

держави, що дозволить зробити суттєвий внесок у економічний розвиток країни.

Розв'язанню зазначених задач присвячено дану роботу. Тут наведені підсумки низки науково-технічних досліджень, конструкторських, технологічних рішень та результати практичного впровадження нових зразків турбогенераторів й заходи з їх модернізації на діючих енергогенеруючих підприємствах.

**Причини виникнення аварійних ситуацій турбо- та гідрогенераторів.** Робота турбо- та гідрогенераторів пов'язана з виникненням складнонапруженого стану їх вузлів і деталей, але ступінь дії різного роду комбінованих навантажень відрізняється для кожного елемента генератора. Це ускладнює проведення розрахунків у комплексі. З метою виявлення найбільш уразливих частин електрогенеруючої машини проведено детальний аналіз пошкоджень, що виникають у генераторах при довгостроковій експлуатації.

За результатами проведеної статистичної обробки даних про виникнення типових аварійних ситуацій, які спостерігаються на електричних генераторах електростанцій, обумовлених відмовами різного роду, побудовано діаграми (рис. 1).

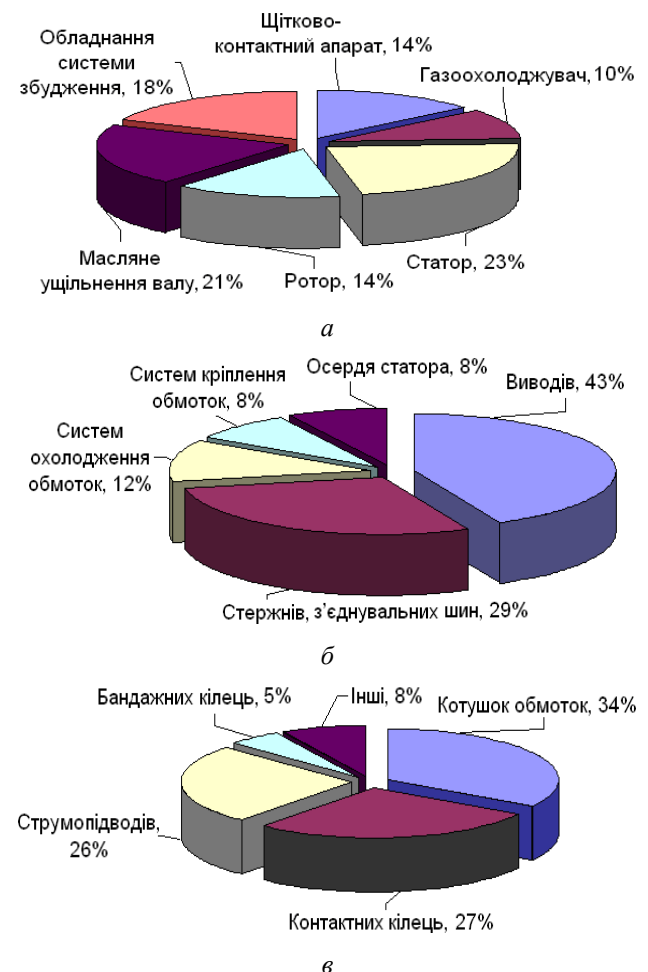


Рис. 1 – Діаграми даних про виникнення типових аварійних ситуацій електрогенераторів: а – загальна картина пошкоджень; б, в – пошкодження статора та ротора відповідно

З рис. 1 видно, що найбільш уразливими частинами є статор, ротор, контактні кільця та струмовідводи. Слід відзначити, що також треба приділити увагу системі охолодження тому, пов'язану з технікою безпеки через наявність водню як охолоджуючого середовища генератора.

Серйозні пошкодження ізоляції лобових частин спостерігаються в результаті дії електродинамічних сил. При цьому лобові частини прагнуть наблизитися до натискних фланців статора та зміститися згідно з обертанням поля ротора. Виникнення коронної активності призводить до замикання листів активної сталі турбогенератора та виходу із ладу всієї машини. Також характерним пошкодженням електричної ізоляції є розтріскування. Через те, що цей дефект призводить до виникнення короткого замикання та можливої пожежі, західні фірми приділяють багато уваги проблемам експлуатації стрижнів.

На сучасному етапі розвитку комп'ютерної техніки та програмних комплексів для моделювання аеро- та газодинамічних процесів й оцінки складнапруженого стану конструктивних елементів об'єкта, що розглядається, проведено комплексні розрахункові дослідження турбо- та гідрогенераторів з урахуванням їх особливостей. Як приклад наведено принципи моделювання основних елементів генераторів.

**Визначення теплового стану роторів турбо- та гідрогенераторів.** Ротор являє собою особливо навантажений вузол турбогенератора. Найбільш відповідальним елементом ротора є обмотка. За результатами аналізу теплового стану обмотки визначається ресурс ротора турбо- та гідрогенератора в цілому.

Сучасні уявлення про надійність конструкцій показують, що з чотирьох причин (втом, повзучість, корозія під напругою і крихкість) найбільш відповідальною за руйнування є крихкість, оскільки з нею пов'язана раптовість завершення руйнування та найважчі наслідки.

Інші три причини сприяють поширенню зародкового дефекту, тобто визначають час прояву крихкості. Тому визначати руйнування в межах явища втоми, корозії під напругою або повзучості під напругою є менш значущим фактором, ніж навчитися вимірювати й порівнювати відносний опір руху тріщин у названих випадках з використанням критеріїв механіки руйнування.

Як правило, тріщини починають розвиватися задовго до повного руйнування, вони виникають і поширюються навіть до вичерпання своєю конструкцією несучої здатності. Тому знання законів поширення тріщин та їх використання дозволяє судити про несучу здатність деталей.

Досягнення в дослідженні руйнування дозволяють зробити такі висновки:

- руйнування в загальному випадку є не критичною подією, а фізичним процесом зародження, об'єднання й зростання тріщин. Цей процес закінчується втратою стійкості однією з таких тріщин;
- субмікро- і мікротріщини – звичайний елемент

дефектної структури, подібний до дислокацій та вакансій, а не наслідок недостатньо ефективної технології виготовлення матеріалу.

Для визначення теплового стану ротора з урахуванням просторового тепловиділення та різних умов тепловіддачі на різних ділянках обмотки розв'язано такі задачі:

- створено математичну модель тривимірного теплового стану обмотки ротора;
- оцінюється тепловиділення в обмотці на різних режимах роботи турбогенератора;
- визначаються умови тепловідведення на різних ділянках обмотки.

Для реалізації поставленої задачі використовується пакет SolidWorks, в якому реалізовано метод скінченних елементів. Тепловий стан вузла визначається в два етапи. На першому етапі проводиться розрахунок течії охолоджуючого середовища методом скінченних обсягів. Рух і теплообмін плинного середовища моделюються за допомогою рівнянь Нав'є – Стокса, що описують закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища. Системи диференціальних рівнянь доповнюються початковими і граничними умовами (III роду), що встановлюють розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні ротора та його елементів.

Безпосереднє визначення теплового стану тіла ротора (2-й етап) здійснюється методом скінченних елементів. Граничними умовами для даного розрахунку є коефіцієнти тепловіддачі, які визначені на попередньому етапі. Розв'язання рівняння Пуассона, що описує теплопередачу в роторі, проводиться методом скінченних елементів.

**Визначення теплового стану «Міжполюсних перемичок».** Для виконання точного розрахунку механічного напруження у конструкції «Міжполюсних перемичок» розроблено модель, яка враховує температурні навантаження, зміну частоти обертання в часі (рис. 2) та зміну характеру охолодження вузла при різних частотах обертання.

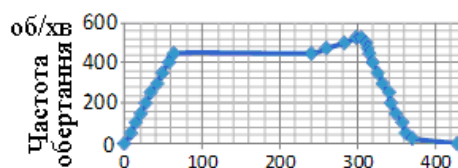


Рис. 2 – Графік залежності частоти обертання від часу

Для аналізу міцності вузла на всіх режимах його роботи з урахуванням теплового стану також використовується метод скінченних елементів, реалізований в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Як приклад розглянемо можливість використання методики, що пропонується для розрахунку турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 та вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4.

**Турбогенератор ТГВ-550-2МУ3.** Здійснивши детальний теоретичний пошук властивостей вітчизняних роторів та їх світових аналогів, було

проведено розрахунки складнапруженого стану ротора турбогенератора ТГВ-550-2МУ3.

Бандажне кільце ротора є самим навантаженим елементом конструкції за умовами експлуатації, навантаження в окремих точках у критичних режимах якого можуть сягати межі текучості (рис. 3), призводить до повного виходу з ладу всієї машини.

Максимальне напруження становить 687 МПа, при цьому коефіцієнт запасу  $k = 686 / 687 = 1,0$ .

Для забезпечення надійності конструкції проведена оцінка складнапруженого стану корпуса турбогенератора потужністю 550 МВт, який відповідає кращим світовим стандартам. Слід зазначити, що вперше було проведено оптимізацію системи охолодження, що потребувала зміни тиску зі звичних 3 до 5 атм.

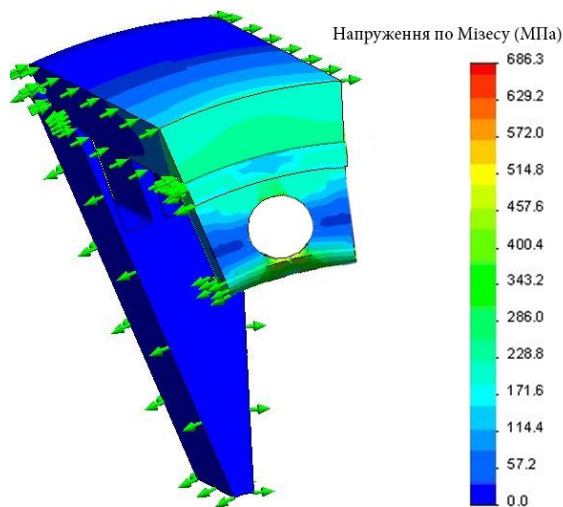


Рис. 3 – Складнапружений стан бандажного кільця ротора

На рис. 4 подано головний зразок турбогенератора на стенді заводу. Короби, де розташовані лобові частини стрижнів, виводи та конструктивні елементи системи охолодження в процесі експлуатації кріпляться диференційними шпильками-пружинами та витримують навантаження понад 100 т, що викликано надмірним тиском в корпусі статора.



Рис. 4 – Випробувальний стенд турбогенератора на стенді заводу ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»

Детальний аналіз отриманих результатів дозволив розробити конструкцію корпуса та підшипникових вузлів приставного типу. Серед отриманих результатів слід зазначити, що така конструкція дає можливість у найкоротший термін проводити ремонтні роботи із заміни активних елементів, без розбирання всього корпусу машини. Великі переміщення в окремих точках не викликають пошкоджень (рис. 5 і 6).

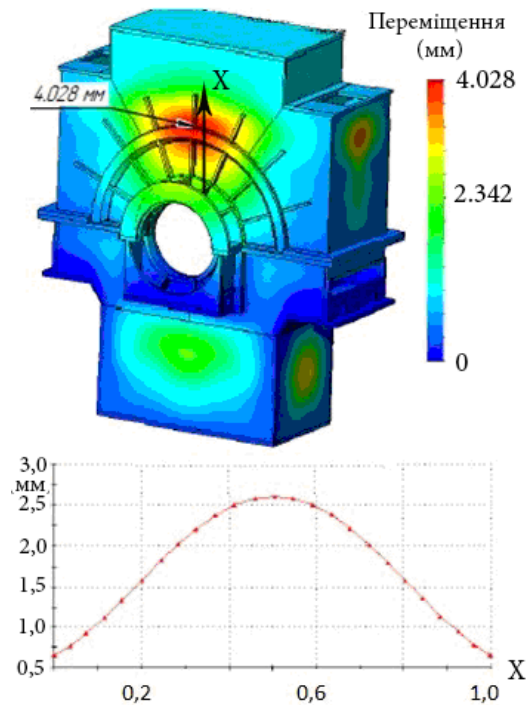


Рис. 5 – Епюра переміщень

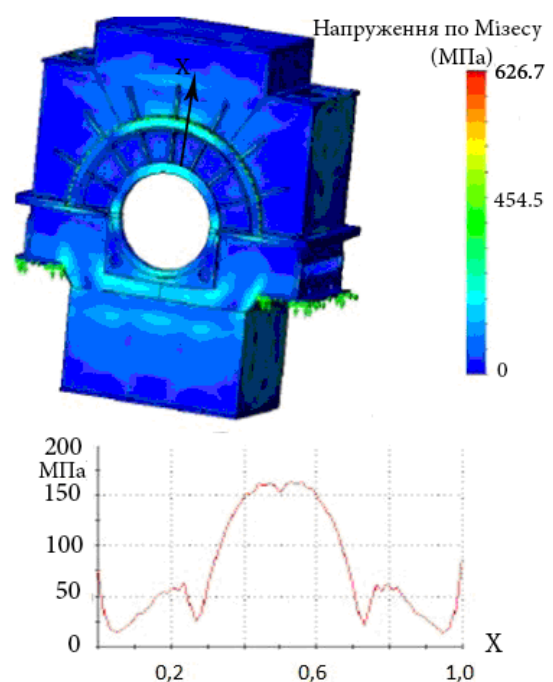


Рис. 6 – Епюра напруженого стану

Згідно з вимогами ГОСТ 533-2000 для турбогенераторів потужністю понад 350 МВт напращування на відмову складає 18000 год, що відповідає повному призначеному терміну служби 40 років. При розрахунку методом скінчених елементів термін служби обмотки при роботі в полі відцентрових сил ( $n = 3000$  об/хв) склав 18000 циклів. Таким чином, низький рівень напруги в обмотці дозволить забезпечити нормований ресурс генератора. Згідно з розрахунковими результатами отримано конструктивні параметри турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 (табл. 1), який є самим потужним із тих, що виготовляються енергобудівними підприємствами України.

Таблиця 1 – Масові характеристики гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4

| Найменування вузла                                        | Маса, кг |
|-----------------------------------------------------------|----------|
| Статор                                                    | 540000   |
| Ротор                                                     | 780000   |
| Хрестовина                                                | 93400    |
| Ванна масляна з підп'ятником та диском у складеному стані | 95400    |
| Перекриття шахти насос-турбіни                            | 34200    |
| Установка повітроохолоджувачів                            | 28350    |
| Підставка                                                 | 2800     |

Розроблений турбогенератор повинен допускати роботу при максимальному тривалому навантаженні 600 МВт з  $\cos \varphi = 0,92$  при надмірному тиску водню 0,45 МПа і температурі технічної циркуляційної води, що надходить в теплообмінники замкнутого контуру водопостачання газоохолоджувачів і в теплообмінники охолодження дистилату, не більше 25°C.

Турбогенератор має допускати тривалу роботу при зниженому тиску водню з відповідним зниженням номінальної потужності. Допустима величина потужності при надмірному тиску 0,35 МПа повинна становити близько 85 %, при 0,3 МПа – близько 80 %, при 0,25 МПа – близько 72,5 %, при 0,2 МПа – близько 65% від номінальної і уточнюється за результатами випробувань.

**Вертикальний оборотний гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4.** Для вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна проводяться розрахунки теплового стану та на міцність аналогічно турбогенератору. Авторським колективом проведено розрахункові дослідження з моделювання та проектування. Внаслідок виконання роботи розроблено вертикальний оборотний гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4, який є найпотужнішим у Європі та відповідає сучасним світовим вимогам, що ставляться до електрогенеруючого обладнання. З огляду на необхідність безаварійної роботи агрегату протягом тривалого терміну при забезпеченні пікових навантажень електромережі для всіх деталей проведені розрахунки складнапруженого стану, які дозволили створити конструкцію, що відповідає кращим світовим стандартам.

Гідрогенератор-двигун з'єднується зі зворотною вертикальною радіально-осьовою гідромашиною установкою (насос-турбіна) типу ОРО 170-В-730 виробництва ВАТ «Турбоатом». Конструкція гідрогенератора-двигуна забезпечує заміну пошкоджених та зношених деталей, виробництво поточних і капітальних ремонтів без повного розбирання гідрогенератора-двигуна і порушення осі валу гідроагрегату. Електрогенеруюча машина відповідає кліматичному виконанню «УХЛ» (категорія розміщення 4, згідно з ГОСТ 15150-69).

Через максимальні масогабаритні параметри (табл. 1) до гідрогенераторів ставляться додаткові вимоги, які необхідно враховувати при встановленні енергетичного устаткування.

За результатами моделювання геометрії та теплових характеристик гідрогенератора-двигуна отримано основні характеристики, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні характеристики гідрогенератора-двигуна.

| Найменування параметру                                                     | Режим генератора | Режим двигуна |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|
| Номінальна потужність, МВ·А / МВт                                          | 360 / 324        | 430 / 416     |
| Номінальна напруга, В                                                      | 15750            | 15750         |
| Номінальний коефіцієнт потужності                                          | 0,90             | 0,979         |
| Номінальна частота обертання, об/хв                                        | 150              | 150           |
| Розгінна частота обертання (без урахування підвищення тиску напорі), об/хв | 210              | 210           |
| Максимальна частота обертання при скидах навантаження, об/хв               | 240              | 240           |
| Частота, Гц                                                                | 50               | 50            |
| Номінальний струм статора, А                                               | 13200            | 15765         |
| Струм збудження при неробочому ході, А                                     | 1230             | 1230          |
| Номінальний струм збудження, А                                             | 2050             | 1990          |

Гідрогенератор-двигун типу СВО-1255/255-40 УХЛ4 синхронний трифазний вертикальний оборотний, призначений для роботи на Дністровській ГАЕС. Ця ГАЕС призначена для використання як джерело пікової потужності, аварійного та частотного резерву, споживач енергії в години провалу графіка навантаження, джерело і споживач реактивної потужності.

Особливістю конструкції гідрогенератора-двигуна є наявність високо напруженого вузла – «Міжполюсна перемичка», який виконує функцію з'єднання електричного кола полюсів між собою. Навантаження, що сприймаються вузлом, викликані тепловим нагріванням та дією відцентрової сили. На основі розробленої методики оцінки складнапруженого стану та теплового впливу на елементи конструкції генераторів проведено розрахункові дослідження з визначення причин

руйнування вузла. Зміну температури в різних точках перемички зі зміною за часом подано на рис. 7. Графіки зміни напружень і переміщень наведені на рис. 8 та 9 відповідно.

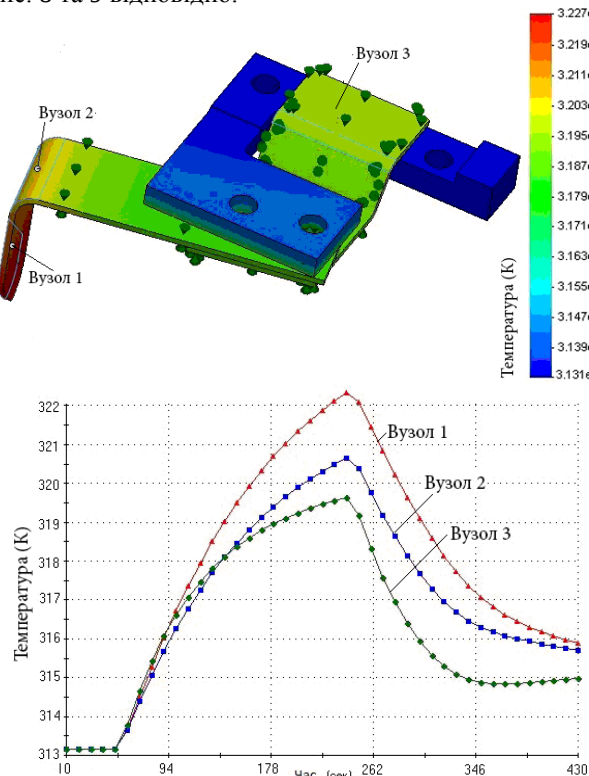


Рис. 7 – Зміна температури

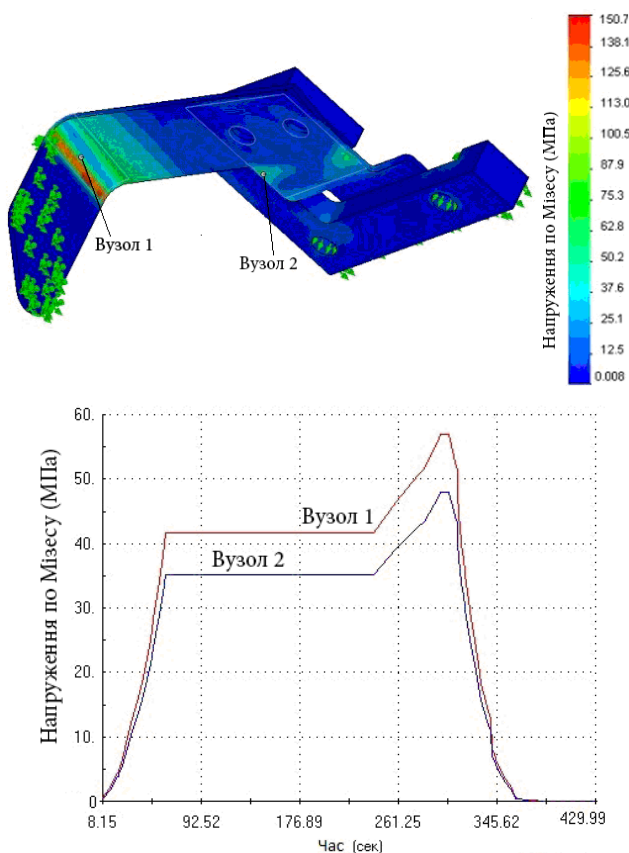


Рис. 8 – Зміна напружень

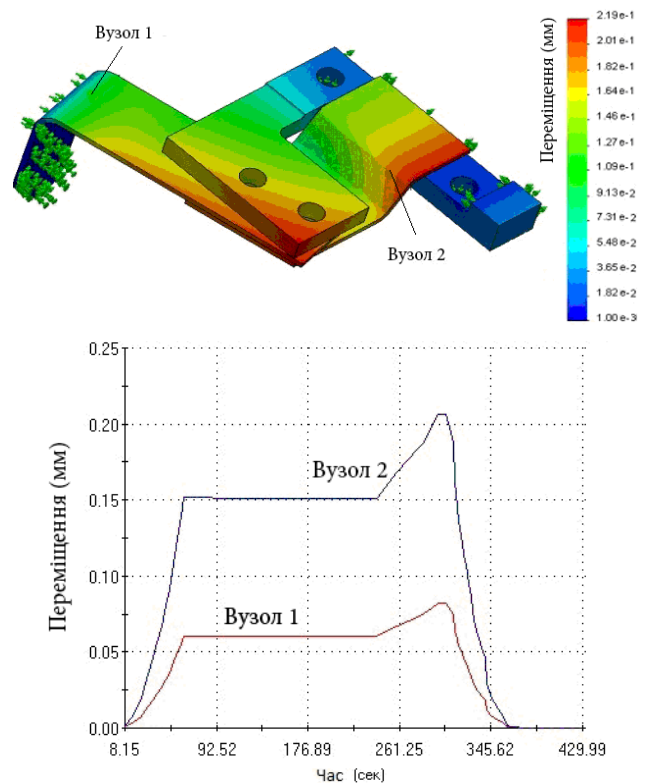


Рис. 9 – Зміна переміщень

Для оцінки часу до руйнування була застосована залежність середнього числа циклів до руйнування від амплітуди змінної напруги, отриманої на основі експериментальних даних, проведених спеціалістами на експериментальній базі Державного підприємства «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ».

Згідно з отриманими результатами, зміна температурного режиму впливає на роботу вищевказаного вузла. Розрахунок дозволив визначити не тільки максимальні напруження, а й характер їх зміни в часі. Урахування виникнення різних переміщень в конструкції дозволяє спрогнозувати руйнування конструкції до його появи. Оцінка показала, що час до руйнування вузла з урахуванням установки додаткових упорів складе понад 30000 циклів, що відповідає нормам щодо проектування та експлуатації гідрогенераторів.

**Висновки.** Розроблено методику проведення розрахункових досліджень теплового та складнонапруженого стану потужних турбо- та гідрогенераторів. За допомогою цієї методики у програмному комплексі SolidWorks Simulation виконано побудову та вибір найбільш раціональної геометрії потужних турбо- та гідрогенераторів. Використання сучасних підходів до конструювання геометрії та моделювання аеро- і газодинамічних процесів дозволило створити потужні генератори нового покоління з підвищеними показниками надійності, довговічності та ремонтпридатності. Це забезпечує високу економічність, надійність та маневреність електрогенеруючого устаткування, дає можливість розв'язувати проблему оновлювання турбо- та гідрогенераторного парку України та розширює експортні можливості енергопідприємств

нашої держави, що дозволить зробити суттєвий внесок у її економічний розвиток.

Проведено роботу з аналізу аварійних ситуацій та розрахунку теплового та складнонапруженого стану найбільш напружених елементів, що дає можливість:

- при проектуванні турбогенераторів великої потужності виконувати механічні розрахунки, що будуть враховувати теплові, електричні та механічні навантаження, викликані дією відцентрових сил;
- при розрахунку великих корпусних деталей та підшипникових вузлів враховувати не тільки сили, що викликані електричними чинниками та дією маси основних деталей на конструкцію, а й сили від збиткового тиску у корпусі;
- враховувати криві втомлюваності, а сталь, що використовується, має витримувати навантаження протягом 30 років.

З використанням розробленої методики проведено розрахункові дослідження з проектування й моделювання потужних турбо- та гідрогенераторів. Це дозволило створити енергетичні установки нового покоління з показниками ефективності та надійності, які відповідають світовим вимогам, що пред'являються до енергетичного устаткування.

Побудовано турбогенератор ТГВ-550-2МУЗ (електричною потужністю 550 МВт) та розроблено технічні умови для його впровадження при безпосередньому з'єднанні з паровою турбіною та встановлення в закритому приміщенні Екібастузської ДРЕС, на існуючий фундамент для турбогенератора ТГВ-500-2 (підтверджується актом впровадження).

Згідно з вимогами ГОСТ 533-2000 для турбогенераторів потужністю понад 350 МВт напруцювання на відмову складає 18000 год, що відповідає повному призначеному терміну служби 40 років. При розрахунку методом скінчених елементів термін служби обмотки при роботі в полі відцентрових сил ( $n = 3000$  об/хв) склав 106 циклів. Згідно розрахунковими результатами отримано конструктивні параметри турбогенератора ТГВ-550-2МУЗ, який є самим потужним із тих, що виробляються енергобудівними підприємствами України.

Також спроектовано та розроблено технічні умови для потужного вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4 (потужністю у режимі генератора 324 МВт, у режимі двигуна 416 МВт) з метою впровадження на Дністровський ГАЕС для використання як джерела пікової потужності, аварійного та частотного резерву, споживача енергії в години провалу графіка навантаження, джерела і споживача реактивної потужності (підтверджується актом впровадження).

Розроблений гідрогенератор-двигун є найпотужнішим у Європі та відповідає сучасним світовим вимогам, що ставляться до електрогенеруючого обладнання. З огляду на необхідність безаварійної роботи агрегату протягом тривалого терміну при забезпеченні пікових навантажень електромережі, для всіх деталей проведені розрахунки складнонапруженого стану, які

дозволили створити конструкцію, що відповідає кращим світовим стандартам.

**Відповідність роботі пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності.** Відповідно до Закону України від 08.09.2011 № 3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» із змінами, внесеними згідно із Законом України № 5460-VI (5460-17) від 16.10.2012, ВВР, 2014, № 2-3, ст.41: Стратегічному пріоритетному напрямку на 2011-2021 роки: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії.

Відповідно до Закону України від 11.07.2001 № 2623 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» із змінами, внесеними згідно із законами України від 09.02.2006 № 3421, від 09.09.2010 № 2519, від 16.10.2012 № 5460): енергетика та енергоефективність.

#### Список літератури

1. Видеман Е. Конструкция электрических машин / Е. Видеман, В. Келленбергер. – Л.: Энергия, 1972. – 520 с.
2. Машины электрические. Общие технические требования: ГОСТ 183-74. – [Взамен ГОСТ 183-66; введ. 01.01.76]. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 27 с. – (Межгосударственный стандарт).
3. Специальные электрические машины / [А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
4. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин / А.Е. Алексеев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 427 с.
5. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
6. Важнов А.И. Электрические машины / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
7. Вольдек А.И. Электрические машины: [учебн. для студентов высших техн. учебн. завед.] / А.И. Вольдек. – [3-е изд., перераб.]. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
8. Виноградов Н.В. Проектирование электрических машин / Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов, П.С. Сергеев. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
9. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гуринов, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.

#### References (transliterated)

1. Videman E. Konstrukcija jelektricheskikh mashin / E. Videman, V. Kellenberger. – L.: Jenergija, 1972. – 520 s.
2. Mashiny jelektricheskie. Obshhie tehicheskie trebovaniya: GOST 183-74. – [Vzamen GOST 183-66; vved. 01.01.76]. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1974. – 27 s. – (Mezhgosudarstvennyj standart).
3. Special'nye jelektricheskie mashiny / [A.I. Bertinov, D.A. But, S.R. Mizjurin i dr.]. – M.: Jenergoizdat, 1982. – 552 s.
4. Alekseev A.E. Konstrukcija jelektricheskikh mashin / A.E. Alekseev. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1958. – 427 s.
5. Bruskin D.Je. Jelektricheskie mashiny i mikromashiny / D.Je. Bruskin, A.E. Zorohovich, V.S. Hvostov. – M.: Vysshaja shkola, 1990. – 528 s.
6. Vazhnov A.I. Jelektricheskie mashiny / A.I. Vazhnov. – L.: Jenergija, 1974. – 840 s.
7. Vol'dek A.I. Jelektricheskie mashiny: [uchebn. dlja studentov vysshih tehn. uchebn. zaved.] / A.I. Vol'dek. – [3-e izd., pererab.]. – L.: Jenergija, 1978. – 832 s.
8. Vinogradov N.V. Proektirovanie jelektricheskikh mashin / N.V. Vinogradov, F.A. Gorjainov, P.S. Sergeev. – M.: Jenergija, 1969. – 632 s.
9. Goldberg O.D. Proektirovanie jelektricheskikh mashin / O.D. Gol'dberg, Ja. S. Gurin, I. S. Sviridenko. – M.: Vysshaja shkola, 1984. – 431 s.

Надійшла (received) 12.02.2018

**Розроблення й впровадження перспективних методів розрахунку і моделювання при проектуванні та експлуатації потужних турбогенераторів та гідрогенераторів для ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС / К.О. Кобзар, О.В. Третяк, О.Ю. Шуть, В.Р. Полієнко, П.Г. Гакал, Є.С. П'ятницька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 38–45. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Разработка и внедрение перспективных методов расчета и моделирования при проектировании и эксплуатации мощных турбогенераторов и гидрогенераторов для ТЭС, АЭС, ГЭС, ГАЭС / К.О. Кобзарь, О.В. Третьяк, О.Ю. Шуть, В.Р. Полиенко, П.Г. Гакал, Е.С. Пятницкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 38–45. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Development and implementation of promising methods and model engineering during the design and operation of powerful turbogenerators and hydrogenerators / K.O. Kobzar, O.V. Tretiak, O.Yu. Shut, V.R. Poliienko, P.G. Gakal, Y.S. Pyatnitskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 38–45. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кобзар Костянтин Олександрович**, головний конструктор з турбогенераторів, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: kk7@ukr.net.

**Кобзарь Константин Александрович**, главный конструктор по турбогенераторам, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

**Kobzar Konstantin**, SE "Plant" Electrotiazhmash", Chief Designer on Turbogenerators, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

**Третяк Олексій Володимирович**, кандидат технічних наук, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», заступник завідувача відділом; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail alex3tretjak@mail.ru.

**Третьяк Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», заместитель заведующего отделом; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

**Tretiak Oleksii**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), SE "Plant" Electrotiazhmash", Deputy Head of Department, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

**Шуть Олександр Юрійович**, заступник начальника відділу проектування гідрогенераторів і КМПТ, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299.

**Шуть Александр Юрьевич**, заместитель начальника отдела проектирования гидрогенераторов и КМПТ, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

**Shut Oleksandr**, SE "Plant" Electrotiazhmash", Deputy Head of Department on Hydrogenerators and LDCM, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

**Полієнко Владислав Русланович**, інженер-конструктор, магістрант, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», НАУ «ХАІ»; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: vlad\_polienko@outlook.com.

**Полиенко Владислав Русланович**, инженер-конструктор, магистрант, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», НАУ «ХАИ»; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский 299; e-mail: vlad\_polienko@outlook.com.

**Poliienko Vladyslav**, design engineer, master student, SE "Plant" Electrotiazhmash"; NAU "KhAI"; 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine; e-mail: vlad\_polienko@outlook.com.

**Гакал Павло Григорович**, доктор технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com.

**Гакал Павел Григорьевич**, доктор технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com.

**Gakal Pavlo**, Doctor of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University, Associate Professor at the Department of Thermal Engineering Aerospace.

**П'ятницька Євгенія Святославівна**, інженер-конструктор, студент, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», НАУ «ХАІ»; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net

**Пятницкая Евгения Святославовна**, инженер-конструктор, студент, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», НАУ «ХАИ»; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский 299; e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net

**Pyatnitskaya Yevgeniya**, design engineer, student, SE "Plant" Electrotiazhmash"; NAU "KhAI"; 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine. e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net