

П. М. МАКАРОВ**ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЯ, СУЧАСНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ
КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Представлена стаття присвячена розгляду особливостей конструкції елементів енергетичного обладнання, зокрема ротора та його елементів: остова та його різновидів, обода та полюсів ротора. Проведено аналіз вимог до параметрів ротора в залежності від махового моменту. Розглянута ситуація виходу з ладу регулятора турбіни безпосередньо під час скидання навантаження. Також були розглянуті параметри експлуатаційних характеристик гідроагрегату, що впливають на надійність його роботи. В статті викладені вимоги до матеріалів, що використовуються при виготовленні елементів роторів енергетичного обладнання. Детально розглянуті такі сучасні технології виробництва цих елементів, як штампування та лазерне різання. Викладені особливості збирання остова ротора та ротора гідроагрегату в цілому, а також розглянуті технології збирання, опресування та заклинування шихтованого обода ротора. В статті було присвячено увагу особливостям послаблення натягу заклинування обода.

Ключові слова: гідроагрегат, ротор, вібрація, технології штампування, лазерне різання, збирання.

P. MAKAROV**THE DESIGN FEATURES, TECHNOLOGIES, MODERN QUALITY EVALUATING METHODS
OF THE ROTOR ELEMENTS OF ENERGY EQUIPMENT**

The presented manuscript is devoted to the consideration of the design features of the elements of power equipment, in particular the rotor and its elements: the spider and its varieties, the rim and poles of the rotor. The analysis of the requirements for the parameters of the rotor depending on the swing moment was carried out. The situation of failure of the turbine regulator directly during load shedding is considered. The parameters of the operational characteristics of the hydraulic unit, which affect the reliability of its operation, were also considered. The manuscript outlines the requirements for materials used in the manufacture of rotor elements of power equipment. Such modern production technologies of these elements as stamping and laser cutting are considered in detail. The peculiarities of assembly of the rotor spider and the rotor of the hydraulic unit as a whole are outlined, as well as the technologies of assembly, pressing and wedging of the rotor charged rim are considered. The manuscript focused on the features of rim wedging tension reduction.

Key words: hydraulic unit, rotor, vibration, stamping technologies, laser cutting, assembly.

Вступ

Конструкція гідроагрегату, зокрема визначається міркуваннями забезпечення механічної міцності конструкції з урахуванням межі плинності використаних матеріалів та необхідністю виконання ряду вимог, що обумовлені особливостями роботи гідравлічної турбіни або особливостями електромереж, до яких підключений гідроагрегат.

Великий вплив на геометричні розміри активних частин гідроагрегату має температура нагріву при експлуатації, яка визначається їх розмірами та питомими електричними навантаженнями, а також вибраною системою охолодження. В першу чергу це стосується обмотки статора, яка зазвичай є визначальною з точки зору забезпечення експлуатаційної температури не вище допустимого значення для використовуваного класу нагрівостійкості ізоляції. Для деяких типів гідроагрегатів визначальною може бути температура обмотки ротора.

Мета роботи

В роботі були розглянуті особливості конструкції елементів енергетичного обладнання, зокрема ротора та його елементів: остова та його різновидів, обода та полюсів ротора. Був проведений аналіз вимог до параметрів ротора в залежності від махового моменту та розглянута ситуація виходу з ладу регулятора турбіни безпосередньо під час

скидання навантаження. Також були розглянуті параметри експлуатаційних характеристик гідроагрегату, що впливають на надійність його роботи. В роботі викладені вимоги до матеріалів, що використовуються при виготовленні елементів роторів енергетичного обладнання. Детально розглянуті технології виробництва цих елементів, такі як штампування та лазерне різання. Були викладені особливості збирання остова ротора та ротора гідроагрегату в цілому, а також розглянуті технології збирання, опресування та заклинування шихтованого обода ротора. Також в роботі було присвячено увагу особливостям послаблення натягу заклинування обода.

Виклад основного матеріалу**Особливості конструкції гідроагрегату**

Параметри ротора гідроагрегату часто залежать від вимог до махового моменту обертових частин гідроагрегату, які визначаються умовами регулювання турбіни, міцності напірного трубопроводу турбіни та обмеженням максимального підвищення частоти обертання при скиданні навантаження. Обертові частини турбіни мають порівняно невеликий маховий момент, тому маховий момент (момент інерції) ротора гідроагрегату повинен бути більшим, ніж це вимагається електромагнітним розрахунком конструкції. Для збільшення махового моменту як правило потрібно збі-

© П. М. Макаров, 2023

льшити діаметр ротора або, в крайньому випадку, коли досягнення махового моменту без штучного збільшення маси ротора є неможливим, встановити окремих маховик, з'єднаний з валом.

Наявність розгінної частоти обертання є особливістю роботи гідроагрегату, з'єднаного безпосередньо з гідравлічною турбіною, яка у випадку раптового скидання навантаження гідроагрегатом якийсь час продовжує працювати з залишковим крутним моментом, оскільки потік води крізь турбіну не може бути раптово зупинений, не викликаючи високого шкідливого підвищення тиску у водоводі.

Співвідношення розгінної частоти обертання до номінальної частоти обертання для гідроагрегатів залежить від вибраного виду турбіни (див. рис. 1). Це співвідношення становить приблизно від 1,7 до 1,9 для ковшових турбін (*Pelton*), від 1,8 до 2,1 для радіально-осьових турбін (*Francis*) та від 2 до 2,2 для поворотно-лопатевої турбін (*Kaplan*) [1].

Для поворотно-лопатевої турбіни (*Kaplan*) теоретично можлива ситуація, коли регулятор турбіни виходить з ладу безпосередньо під час скидання навантаження (так зване порушення комбінаторної залежності), при цьому угонна частота обертання може досягти 3-кратної номінальної частоти обертання. Проте така ситуація є вкрай малоімовірною, через це в деяких нормативних документах на гідроагрегати вказані вимоги до міцності елементів тільки для угону поворотно-лопатевої турбіни зі збереженням комбінаторної залежності, тобто можливість порушення комбінаторної залежності взагалі не розглядається. Зокрема це стосується раніше використовуваних стандартів, на основі вимог яких була розроблена більша частина гідроагрегатів, що зараз експлуатуються на ГЕС України. У сучасному стандарті ДСТУ EN IEC 60034-33:2022 таке розмежування вимог відсутнє [2]. Ротор гідроагрегату повинен бути розрахований на задану розгінну частоту обертання, при цьому запас міцності за середніми механічними напруженнями у всіх елементах ротора, в першу чергу в ободі, який зазвичай є найбільш механічно напруженим вузлом, має бути на рівні не менше 1,5 відносно межі плинності матеріалу. Пружна радіальна деформація ротора при цьому не повинна досягати величини мінімально припустимого за умовами збирання гідроагрегату повітряного зазору.

Опис конструкції енергетичного обладнання

Загальна конструкція гідроагрегату

Загальна конструкція гідроагрегату наведена на рис. 2.

Ротор є найскладнішим конструктивним вузлом гідроагрегату, а його вага може сягати 50 %

від загальної ваги агрегату. Ротор складається з наступних основних деталей: вала, остова з втулкою, обода та полюсів, що закріплені на ободі (див. рис. 3).

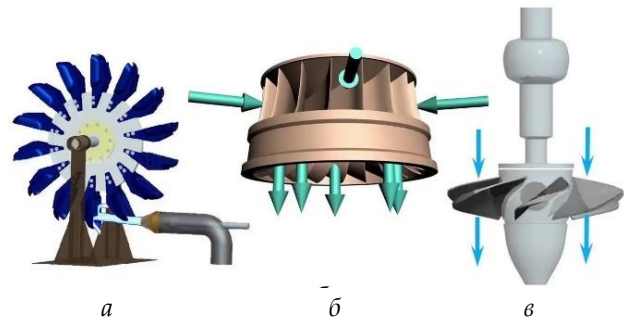


Рис. 1 – Типи гідротурбін: а – ковшова (*Pelton*); б – радіально-осьова (*Francis*); в – поворотно-лопатева (*Kaplan*)

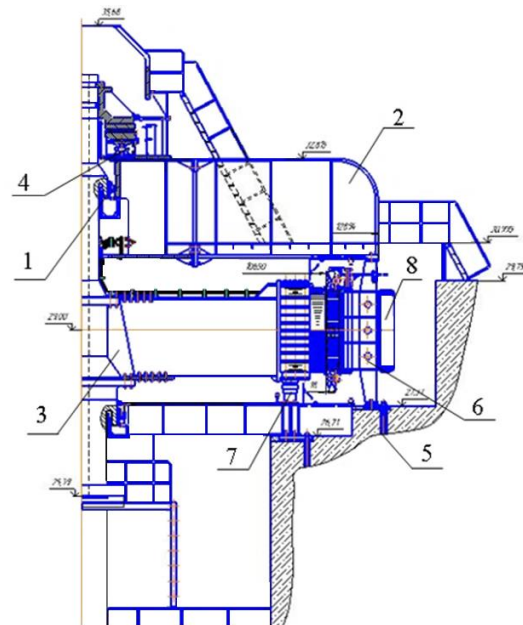


Рис. 2: Загальна конструкція гідроагрегату: 1 – вал; 2 – хрестовина; 3 – втулка ротора; 4 – під'ятник; 5 – кріплення статора до фундаменту; 6 – статор; 7 – гальма; 8 – повітроохолоджувач

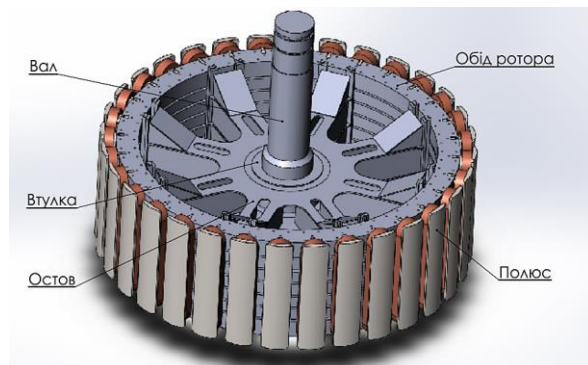


Рис. 3 – Будова ротора гідроагрегату

Будова остова ротора

Основна відмінність роторів гідроагрегатів від інших електричних машин – це конструкція остова ротора. В залежності від зовнішнього діаметра ротора існують два основних види остова ротора: дисковий та спицевий.

Для тихохідних агрегатів великої потужності доцільно збільшувати діаметр ротора до межі, що обмежується його механічною міцністю при угонній швидкості обертання. Зі збільшенням діаметра ротора досягається найкраще охолодження генератора та зниження ваги обода при заданому маховому моменті гідроагрегату. Максимальний діаметр ротора приймається з умови, щоб величина

деформації обода при угонній частоті обертання не перевищувала допустимих відхилень повітряного зазору між полюсами ротора і обмоткою статора.

Однак, ротори з зовнішнім діаметром більше 4 метрів унеможливають транспортування його в зібраному вигляді. Тому для середніх та великих гідрогенераторів використовують спицеві роз'ємні остови (див. рис. 4), які представляють собою зварену зіркоподібну конструкцію. Спицеві остови конструктивно складніші, оскільки болтове з'єднання кожної спиці має бути розраховане на передачу відповідної частини крутного моменту.

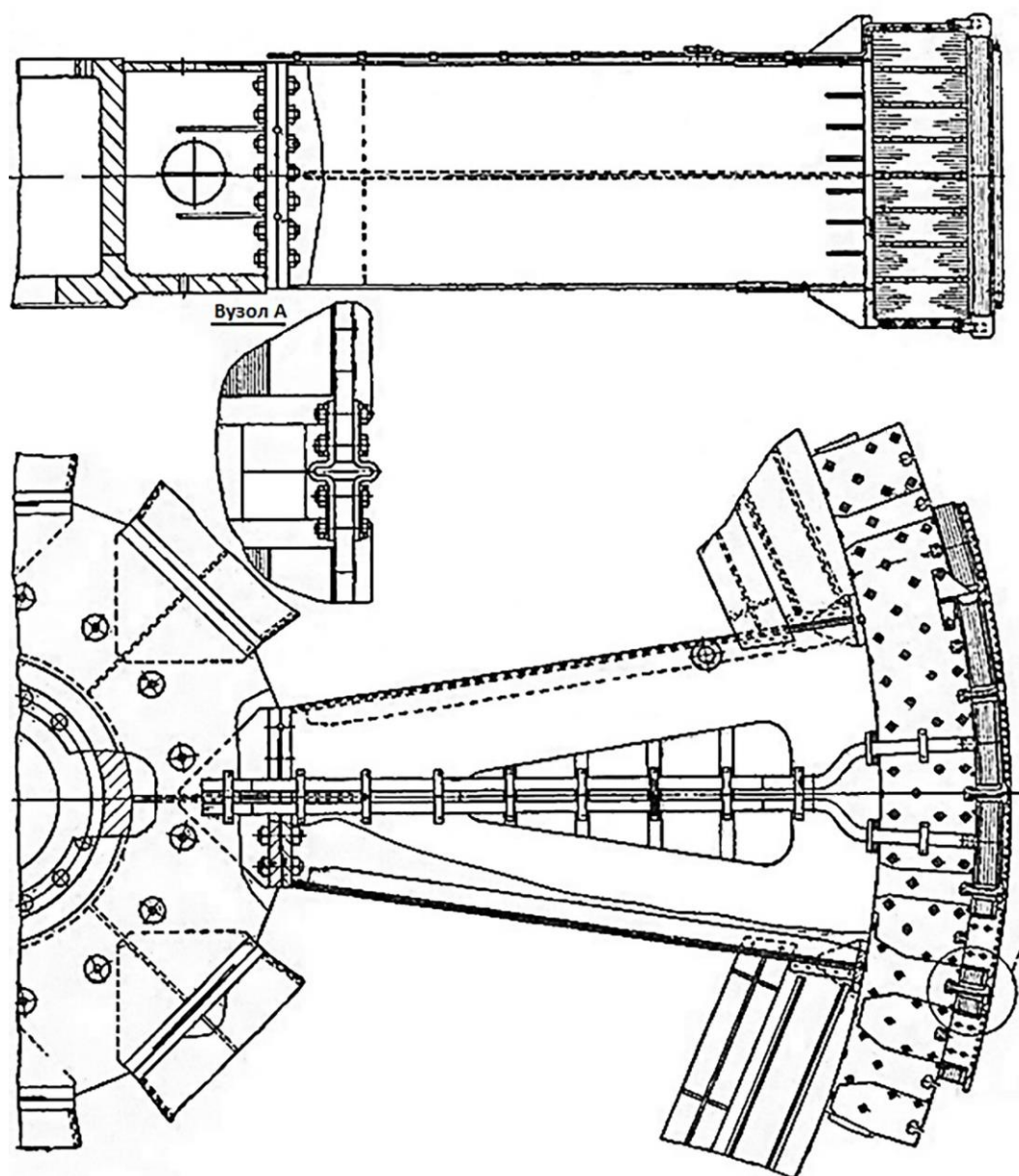


Рис. 4 – Ротор із спицевим роз'ємним остовом

Обід ротора

Спицевий остов складається з насадженої на вал втулки та спиць, які кріпляться до втулки за допомогою стикових плит, стяжних шпильок і штифтів. Для великих гідроагрегатів з метою зменшення маси застосовують варіант, коли втулка ротора заміняє частину валу гідроагрегату. Центральна частина (втулка) – зварена (або лита в зонтичних генераторах) і є одночасно втулкою під'ятника. Форма її визначається технологією виробництва: деякі виробники обробляють зварювальну центральну втулку і сполучають з нею стикові плити спиць на карусельному верстаті. В цьому випадку втулки мають циліндричну форму, інші виконують її у вигляді багатогранника, обробляючи стикові поверхні на фрезерній колоні. На кінцях, спиці по верхніх і нижніх полицях зв'язуються між собою легкими балками, що фіксують правильність положення спиць по торцях.

Спиці сполучаються з ободом за допомогою клинових елементів (див. рис. 5). Подібні клинові елементи також використовуються для кріплення полюсів на ободі.

Як правило, ротор гідроагрегату має шихтований обід, що збирається на калібрах та шпильках з окремих сегментів, штампованих з листової сталі товщиною 3 – 4 мм. Обід є найбільш напруженим у механічному відношенні вузлом ротора. Міцність обода визначає вибір кругової швидкості та як наслідок габаритів ротора.

З урахуванням того, що обід використовується також як вентилятор, виникає необхідність у правильному виборі довжини сегмента, визначаючи цим розміри численних зазорів між їх бічними сторонами. Половина цих зазорів, розташовуючись між полюсами, служить каналами для проходження охолоджуючого повітря і відіграє істотну роль в системі вентиляції гідроагрегату.

Для проходження повітря в ободі передбачається кілька вентиляційних каналів, що утворюються дистанційними розпорками. Зверху на спицях обід замикається замками для запобігання зміщення вгору відносно остова при підйомі на гальмадомкратах.

До нижньої, торцевої, частини ротора кріпиться гальмівне кільце, що складається з окремих сегментів. У гідроагрегатів великого діаметра гальмівне кільце укріплено безпосередньо на ободі його стяжними шпильками.

Полюси ротора

Полюс ротора складається з осердя, котушки обмотки збудження, ізоляції та демпферної обмотки (див. рис. 6). Частина осердя, що спрямована до статора, називається «башмаком»; його форма та розміри визначаються, з одного боку, умовами отримання поля збудження синусоїдальної форми,

з іншого – розміщенням демпферної обмотки та механічною міцністю краю полюса. Осердя має один або два хвости, зазвичай T-образної форми, якими полюс кріпиться до обода. Осердя, як правило, виконується шихтованим з тонких листів сталі з масивними щоками по торцях і стягується довгими шпильками.

Обмотка збудження складається з полюсних котушок, з'єднаних послідовно. З'єднання верхнього витка котушки з верхнім та нижнього з нижнім сусідніх котушок забезпечує почергову зміну полярності.

Майже всі гідроагрегати виконуються з поздовжньо-поперечною демпферною обмоткою, розміщеною в пазах полюсних наконечників. Поздовжню частину складають мідні стрижні, закладені в отвори осердя полюса. Мідні демпферні стрижні, як правило, неізолювані, досить щільно встановлені в напівзакритих осьових пазах на поверхні полюса. Масивні мідні полюси-сегменти по торцях полюса коротко замикають стрижні і разом з еластичними міжполюсними перемичками утворюють по торцях полюсів два замкнуті кільця.

Демпферна обмотка послаблює поле зворотної послідовності при несиметричному навантаженні та знижує амплітуду коливань ротора, що виникають у деяких випадках при паралельній роботі агрегату.

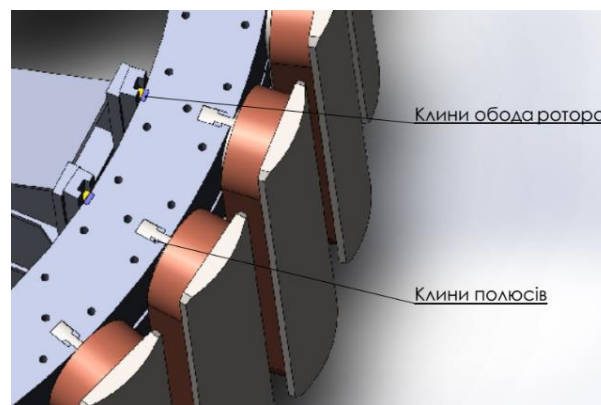


Рис. 5 – Розташування клинових елементів ротора гідрогенератора

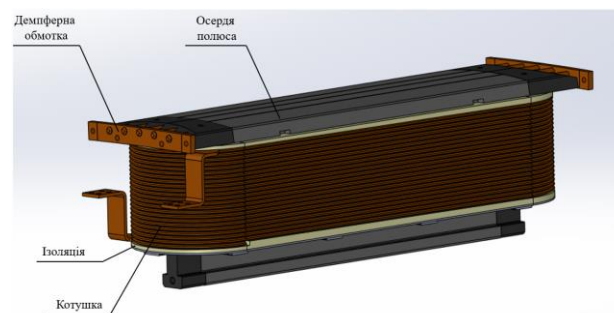


Рис. 6 – Конструкція полюса ротора

Технологія штампування, лазерного різання сегментів та складання обода ротора

В описаній конструкції ротора, обід гідроагрегатів виконується шихтованим та збирається з окремих сегментів. Основними методами виготовлення сегментів для обода ротора є штампування та лазерна різка. Розглянемо детальніше особливості, переваги та недоліки кожного методу.

Штампування як технологічний процес обробки заготовок, виготовлених з металу, дозволяє отримати готові вироби плоского або об'ємного типу, що відрізняються як своєю формою, так і розмірами. Як робочий інструмент при виконанні штампування може виступати штамп, закріплений на пресі або обладнанні іншого типу. Залежно від умов виконання штампування металу буває гаряче та холодне. Ці два види даної технології передбачають використання різного обладнання та дотримання певних технологічних норм.

При виконанні холодного штампування металевих деталей процес формування готового виробу протікає тільки за рахунок тиску, що створюється робочими елементами преса на заготовку. За рахунок того, що заготовки при штампуванні за холодною технологією попередньо не нагріваються, вони не піддаються усадці. Це дозволяє виготовляти вироби закінченого виду, які не вимагають подальшого механічного доопрацювання. До недоліків холодного листового штампування металу відноситься висока вартість обладнання, а суттєва економічна вигода даного процесу можлива лише у серійному виробництві.

У минулому столітті допускалося виготовлення листів обода ротора зі сталі Ст3 (межа плинності $\sigma_T = 255$ МПа), а згодом почали переходити на високолеговані сталі марки 10ХСНД, що мають поліпшені механічні властивості (межа плинності $\sigma_T = 390$ МПа). У сучасній практиці також використовуються термомеханічно зміцнений прокат за стандартом EN 10149-2009 з межею плинності до 960 МПа [3], проте у такому випадку використання штампування може бути ускладненим через надвисокі зусилля вирубки заготовок внаслідок високої міцності матеріалу.

Внаслідок холодної пластичної деформації спотворюється кристалічна структура металу; зерна, з яких він складається, витягуються в одному напрямку; зростає міцність та знижується пластичність. Це пов'язано з напруженнями, які виникають у листовому прокаті при штампуванні та розподіляються нерівномірно. При певному згинальному моменті, який виникає в штампі преса, частина металу, що відокремлюється, злегка згинається і набуває опуклу форму. Вигин заготовки, поворот її перерізів у просторі викликає відхилення центральної частини від торця штамп [4]. Це призводить до нерівномірного розподілу нормальних напружень на контактній поверхні, що, у свою

чергу, викликає нерівномірний розподіл радіальних напружень, за товщиною заготовки і в шарах металу, паралельних її площині. (див. рис. 7).

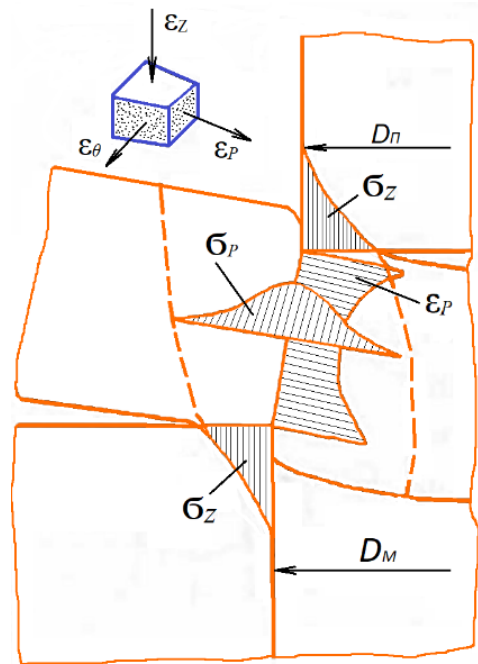


Рис. 7 – Епюри напружень та деформацій при штампуванні

Це явище називається наклеп. Деформувати наклепаний метал важче, потрібні більші зусилля та потужніше обладнання. Тому холодна пластична деформація застосовується рідше, тільки для пластичних металів або заготовок малого перерізу (листи, дріт).

Зважаючи на те, що виробництво гідроагрегатів відноситься до одиничного або малосерійного, використання холодної штамповки для виробництва обода ротора є економічно недоцільним, а значна деформація металу призводить до великих технологічних допусків, що є неприпустимим для надійної роботи агрегату.

Лазерне різання металу – найбільш прогресивний процес обробки металів. Воно дозволяє створювати високоякісні елементи з таких металів та сплавів, як латунь, мідь, легована, інструментальна та нержавіюча сталі, титан, алюмінієві сплави та ін.

Лазер досить широко застосовується у різних галузях промисловості. На сьогоднішній день завдяки високій точності та складноконтурному розкрою він є найкращою альтернативою механічній обробці металів. Лазерне різання також здатне скоротити час виробничого процесу та забезпечити високу точність різання, без нагрівання виробу та збереження механічних властивостей матеріалів. Сьогодні компанії, які займаються лазерною різкою металу використовують два типи лазерів:

– твердотільні (YAG лазери), потужність яких зазвичай не перевищує 1 – 6 кВт, а довжина хвилі – 1 мкм;

– газові (CO₂-лазери) з потужністю 50 – 15000 Вт, активним середовищем яких є гелій, аргон, азот, а також вуглекислий газ.

Більшість сталей вважаються ідеальним матеріалом для лазерного різання. Такі високоміцні метали, як AISI-SAE 4130 (хромолібденова сталь) і 4340 (хромнікельмолібденова сталь), показують виняткову точність лазерного різання з мінімальною шорсткістю поверхні.

Технологічні переваги лазерного різання:

– виготовлена деталь набуває ідеальної лінії зрізу, яка не потребує додаткової обробки;

– внаслідок оптимізації розкрою листа металу значно скорочується кількість відходів;

– можливість працювати з найбільш крихкими та тонкими матеріалами;

– збільшення продуктивності завдяки роботі на максимальній швидкості лазерного розкрою.

Однак використання методу лазерного різання має недоліки, пов'язані з габаритами виробів. Наразі немає лазерів, що здатні обробляти товстостінні метали, а максимальний розмір заготовочного листа не повинен перевищувати 3000×1500 мм.

Відповідно до сучасних вимог щодо міцності і надійності гідроагрегатів технологія виготовлення сегментів обода ротора за допомогою лазерного різання є найбільш ефективною.

Збирання остова ротора

Остов ротора збирається на вала гідроагрегату з насадженою на нього втулкою ротора або безпосередньо на втулці ротора при «безвальній» конструкції ротора. В деяких випадках збирання остова може виконуватися на тимчасовій технологічній втулці з наступним закріпленням остова до вала генератора безпосередньо в кратері гідроагрегату. Збирання остова як правило виконується на спеціальному технологічному стенді, що постачається разом з елементами ротора.

Установка спиць остова ротора виконується за допомогою крану, при цьому зовнішні кінці спиць опираються на регульовані за висотою технологічні опори, що забезпечує однакове висотне положення всіх спиць і полегшує процес затягування болтів. Щоб уникнути перекосів, що можуть викликатися нерівномірністю навантаження на центральну втулку, спиці рекомендується встановлювати по черзі з протилежних сторін.

Кріплення спиць до втулки ротора, залежно від конструкції, виконується радіально або вертикально спрямованими болтами і циліндричними штифтами, встановленими на роз'ємах цих елементів. Болти затягуються до щільного сполучення площин за допомогою динамометричного ключа з

метою обмеження механічних напружень. Щільним вважається таке сполучення елементів, коли в роз'єм не проходить шуп завтовшки 0,1 мм, при цьому допускаються тільки місцеві нещільності не більше 10 % ширини з'єднання.

Після закріплення спиць та встановлення між ними розпірних балок виконується перевірка правильності розташування спиць, а саме радіусів від осі остова до зовнішньої поверхні клинної смуги, тангенціальних відстаней між пазами в клинових полосах сусідніх спиць, висотні позначки опорних зубів спиць. Перевірка радіусів виконується за допомогою спеціальної технологічної стріли. При відхиленнях від вимог технічної документації виконуються роботи з виправлення остову ротора.

Збирання та опресування шихтованого обода ротора

Складання та опресування сталі обода ротора зазвичай виконується на тому ж технологічному стенді, що використовувався для збирання остова. Поверхні сегментів обода ротора перед встановленням треба ретельно очистити від антикорозійних покриттів, іржі та задирок, якщо вони залишилися після виготовлення.

Складання обода починається з установки гальмівних сегментів, які розташовуються горизонтально та концентрично на відповідних регульованих підставках.

Після перевірки положення гальмівних сегментів розпочинається вкладання сегментів обода ротора. При укладанні першого шару сегментів потрібно простежити за збіжністю розташування паців в сегментах та остові ротора. Вкладання сегментів виконується пошарово з виконанням вимог креслення, щодо зміщення сусідніх шарів сегментів в тангенціальному напрямку, що має велике значення для забезпечення механічної міцності обода. Вкладання виконується на технологічних оправках, що встановлюються у отвори на вже встановлених сегментах та забезпечують збіжність отворів під шпильки та пазу на усіх шарах встановлених сегментів.

В процесі вкладання сегментів необхідно контролювати тип використаних сегментів, бо в різних місцях за висотою обода можуть використовуватись сегменти різних типів (наприклад сегменти з додатковими пазами під встановлення пружин для притискання котушок полюсів або сегменти з вентиляційними розпорками).

Періодично в процесі збирання обода виконується його опресовування за допомогою технологічних шпильок відповідної висоти. Зазвичай опресовування виконується в залежності від розташування вентиляційних каналів в ободі через кожні 500 – 600 мм висоти [5], [6]. При цьому, кожен опресований пакет, перед складанням листів наступного пакета, фіксується в спресованому

стані спеціальними планками, привареними зовні і зсередини обода. Після закінчення складання обода фіксує планки видаляються, а місця їх приварювання шліфуються.

Існує також технологія опресовування осердя за допомогою гідродомкратів, що дозволяє збільшити висоту пакета при опресовуванні або ж взагалі обійтися без проміжних опресовувань та зробити тільки остаточне опресовування повністю зібраного обода ротора. Проте через збільшення вартості технологічного обладнання така технологія використовується лише на ГЕС з великою кількістю однотипних гідрогенераторів.

Після остаточної стяжки обода ротора за допомогою тимчасових шпильок або гідродомкратів виконується калібрування отворів під встановлення постійних шпильок. Калібрування виконують спеціальними прошивками (дорнами), яким передається ударне навантаження від пневматичного обладнання або зусилля від крану машинного залу. Після закінчення калібрування отворів в них встановлюються постійні шпильки, для їх встановлення використовуються пневмомолотки та спеціальні технологічні оправки.

Затягування постійних шпильок виконується за допомогою динамометричного ключа з метою рівномірності створюваних у них напружень. Після остаточної стяжки гайки стяжних шпильок фіксуються відносно обода та шпильок за допомогою зварювання.

Після затягування встановлених постійних шпильок процес калібрування, встановлення та затягування шпильок повторюється на отворах, які були зайняті технологічними стяжними шпильками.

Також на зібраному ободі виконується калібрування пазів під клини кріплення обода до спиць і під хвостовики полюсів.

Остаточним етапом збирання обода ротора є його розклинування на остові за допомогою зустрічних клинів, що встановлюються у співпадаючі пази обода та клинових полос остова. Заклинювання виконується після нагрівання обода ротора, завдяки чому той розширюється з утворенням додаткових радіальних зазорів між ним і остовом. Після остигання вже заклиненого обода ротора в місцях заклинювання виникає натяг, який буде забезпечувати надійну роботу цього вузла.

Послаблення натягу заклинування обода, відхилення форми ротора від номінальної, причини та наслідки

Під час збирання ротора на монтажному майданчику ГЕС отримати ідеальну циліндричну форму ротора майже неможливо. Через великі розміри деталей та вузлів ротора, що збираються разом, навіть незначні неточності їх виготовлення неми-

нуче призводитимуть до відхилення форми ротора від циліндричної.

Також в процесі експлуатації гідроагрегату ротор знаходиться під впливом багатьох факторів. На елементи ротора діють відцентрові зусилля при обертанні ротора (особливо у разі раптових скидань навантаження гідроагрегату, що супроводжується підвищенням частоти обертання ротора до так званої угонної частоти обертання), зусилля від сили тяжіння, термічні деформації внаслідок нагрівання активних частин, магнітні зусилля через вплив електромагнітного поля. Всі ці чинники призводять до ослаблення натягу посадки обода ротора та змінення первинної форми ротора [7], [8]. Ці фактори мають особливо великий вплив у початковий період експлуатації, коли відбувається сумісне припрацювання вузлів, вибираються всі монтажні зазори. При цьому обід ротора після набуття експлуатаційних деформацій не повертається у первісний стан, а за рахунок залишкових деформацій відбувається зменшення натягу посадки обода на остов ротора. У разі нерівномірності цих залишкових деформацій вздовж окружності ротора виникає викривлення його форми.

Тому, зазвичай, підприємства-виробники гідроагрегатів рекомендують виконувати роботи з ремонту обертових частин гідроагрегату після кількох перших років роботи, проте в силу різних причин ці рекомендації не завжди виконуються.

Наслідком послаблення натягу посадки обода на остов є так зване відділення обода від остову, коли через відцентрове розширення обода ротора при наборі частоти обертання після пуску гідроагрегату (тобто при частоті обертання нижче за номінальну) натяг повністю щезає. Це призводить до циклічних зсувів обода по опорній поверхні зубців остова при кожному пуску та зупинці гідроагрегату. Кількість таких переміщень, з урахуванням особливостей роботи гідроагрегатів, що передбачають можливість кількох пусків та зупинок на протязі доби за весь час експлуатації гідроагрегату, може сягати 104 – 105 разів. З часом такі циклічні переміщення викликають контактну фретинг-корозію опорних зубів остова ротора, що в свою чергу може призвести до утворення втомних тріщин на поверхні тертя зубів з наступним їх руйнуванням.

Таке відділення обода від остова може відбуватися також за умови збереження проектного натягу, але лише під час збільшення частоти обертання ротора вище номінальної. Проте такі режими роботи гідроагрегату зустрічаються вкрай рідко та не призводять до негативних наслідків у вигляді фретинг-корозії. Для безпечної експлуатації гідроагрегатів вважається достатнім, щоб частота обертання, за якої стається відділення обода від остова, була як мінімум на 25 % вищою за номінальну частоту обертання ротора.

Що стосується викривлення форми ротора, то наслідком цього може бути порушення балансування ротора та поява неврівноваженого магнітного зусилля між ротором і статором, що буде обертатися з обертовою частотою обертання ротора. Як порушення балансування, так і поява неврівноваженого магнітного зусилля призводить до підвищення вібрації опорних вузлів гідрогенератору [9], [10]. Така підвищена вібрація в свою чергу може викликати порушення в роботі напрямних підшипників гідроагрегату.

Також значні порушення форми ротора можуть вплинути на форму електромагнітного поля в магнітній системі гідроагрегату, що призведе до погіршення якості вироблюваної електроенергії через появу вищих гармонічних складових і відхилення вихідної напруги гідроагрегату від синусоїдальної форми.

Вимірювання фактичної форми ротора проводиться одночасно з вимірюванням форми статора на зібраному гідроагрегаті шляхом замірів повітряних зазорів між полюсами ротора та розточкою осердя статора при поступовому повертанні ротора (на одне полюсне ділення на кожному кроці вимірювання). При цьому форма статора вимірюється відносно одного з полюсів ротора, який проходить по всьому колу розточки статора, а форма ротора вимірюється відносно однієї точки статора, повз яку проходять всі полюси ротора.

Оцінка результатів цих вимірювань проводиться за допомогою математичного аналізу шляхом розкладання в ряд Фур'є за допомогою чисельного інтегрування результатів вимірювань методом прямокутників [7], [11].

При цьому значення нульової гармонічної складової розкладання в ряд Фур'є відповідає середньому арифметичному значенню всіх вимірювань по колу зазорів. Значення амплітуди та фазного кута першої гармоніки відповідають величині та напрямку зміщення геометричної осі вимірюваних форм статора і ротора відносно осі обертання гідроагрегату. Значення амплітуди другої гармоніки розкладання в ряд Фур'є відповідає величині еліптичності вимірюваних форм. Наступні гармонічні складові показують відхилення вже більш складної форми.

При цьому основне практичне значення завжди мають результати розкладу в ряд Фур'є за першою гармонікою, бо зміщення геометричної осі форми обода ротора відносно осі його обертання може бути виправлене під час переклинування обода шляхом зміщення усього кільця обода відносно остова в потрібну сторону. Вищі складові розкладання форми ротора в ряд Фур'є важко підлягають виправленню через значну жорсткість зібраного в кільце обода порівняно з жорсткістю остова, що при спробі виправлення може призвести лише до збільшення деформації окремих спиць

остова, але практично не вплине на форму самого обода.

На діючих гідроагрегатах рекомендується періодично перевіряти достатність натягу посадки обода на остов шляхом вимірювання відділюючої частоти обертання обода від остова. Для цього використовуються механічні датчики важільного типу, які встановлюються на остові ротора та фіксують переміщення обода ротора відносно остова в радіальному напрямку. Випробування проводиться для декількох режимів з різними частотами обертання ротора гідроагрегату з перевіркою наявності радіального переміщення після закінчення кожного з режимів. У разі виявлення відділення обода від остова при частоті обертання нижче за номінальну рекомендується виконати відновлення натягу шляхом гарячого переклинування обода.

Суттєві послаблення розклинування обода ротора також можуть проявлятися візуально у вигляді осьового зміщення обода відносно остова під час підйому ротора на гальмах-домкратах.

Висновки

В поданій статті були розглянуті особливості конструкції елементів енергетичного обладнання, зокрема ротора та його основних елементів: остова, обода та полюсів ротора. Був проведений аналіз вимог до параметрів ротора в залежності від махового моменту та розглянута ситуація виходу з ладу регулятора турбіни безпосередньо під час скидання навантаження. Були розглянуті параметри експлуатаційних характеристик гідроагрегату, що впливають на надійність його роботи. Також були викладені вимоги до матеріалів, що використовуються при виготовленні елементів роторів енергетичного обладнання та детально розглянуті технології виробництва цих елементів, такі як штампування та лазерне різання. Були розглянуті особливості збирання остова ротора та ротора гідроагрегату в цілому, а також технології збирання, опресування та заклинуння шихтованого обода ротора. Також в роботі було присвячено увагу особливостям послаблення натягу заклинуння обода.

Список літератури

1. Parker F. 28 Part. Alternating Current Generators / F. Parker ; Ed.: M. A. Laughton, D. J. Warne // Electrical Engineer's Reference Book. – 2007. – P. 901–959. – ISBN 0-7506-46373. – URL: <https://web.itu.edu.tr/~duzgunb/reference8.pdf> (дата звернення: 20.11.2023).
2. ДСТУ EN IEC 60034-33:2022 Машини електричні обертові. Частина 33. Синхронні гідрогенератори, включаючи мотор-генератори. Особливі вимоги (EN IEC 60034-33:2022, IDT; IEC 60034-33:2022, IDT). – Чинний 31.12.2023. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102789 (дата звернення: 20.11.2023).
3. ДСТУ EN 10149-1:2009 Вироби зі сталі з високою границею пластичності плоскі гарячекатані для холодного формо-

- змінювання. Частина 1. Загальні умови постачання (EN 10149-1:1995, IDT). – Чинний 01.01.2012. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29426 (дата звернення: 20.11.2023).
- Юхимчук В. Д. Технологія виробництва електричних машин : підручник / В. Д. Юхимчук – Харків : Тім Пабліш Груп, 2014. – 750 с. – URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/elmash/wp-content/uploads/sites/108/2018/06/Tehnologiya-virobnitstva-elektrichnih-mashin.-Pidruchnik.YUhimchuk-V.D.-2014.pdf> (дата звернення: 20.11.2023).
 - Pickering S. J. Modelling ventilation and cooling of the rotors of salient pole machines / S. J. Pickering, D. Lampard, M. Shanel // IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – 2001. – Cat. No.01EX485. – ISBN 0-7803-7091-0. – DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2001.939411>.
 - Traxler-Samek G. Cooling Airflow, Losses, and Temperatures in Large Air-Cooled Synchronous Machines / G. Traxler-Samek, R. Zickermann, A. Schwery // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57, Is. 1. – P. 172–180. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2031191>.
 - Tretiak O. The Methods of Three-Dimensional Modeling of the Hydrogenerator Thrust Bearing / O. Tretiak, D. Kritskiy, I. Kobzar, M. Arefieva, V. Nazarenko // Computation. – 2022. – Vol. 10, Is. 9. – P. 152. – DOI: <https://doi.org/10.3390/computation10090152>.
 - Tretiak O. Modeling of the Stress–Strain of the Suspensions of the Stators of High-Power Turbogenerators / O. Tretiak, D. Kritskiy, I. Kobzar, V. Sokolova, M. Arefieva, I. Tretiak, D. Hromenko, V. Nazarenko // Computation. – 2022. – Vol. 10, Is. 11. – P. 191. – DOI: <https://doi.org/10.3390/computation10110191>.
 - Valavi M. Analysis of magnetic forces and vibration in a converter-fed synchronous hydrogenerator / M. Valavi, A. Nysveen, R. Nilsen, J. Le Besnerais, E. Devillers // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA. – 2017. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096018>.
 - Грубой А. П. Опыт восстановительного ремонта механической части роторов гидрогенераторов/двигателей ГАЭС «Жарновец» (Польша) / А. П. Грубой, А. Н. Кирьянов // Гідроенергетика України. – 2004. – № 1. – С. 30–33. – ISSN 1812-9277.
 - Tretiak O. Stress-Strained State of the Thrust Bearing Disc of Hydrogenerator-Motor / O. Tretiak, D. Kritskiy, I. Kobzar, M. Arefieva, V. Selevko, D. Brega, K. Maiorova, I. Tretiak // Computation. – 2023. – Vol. 11, Is. 3. – DOI: <https://doi.org/10.3390/computation11030060>.
 - vklyuchayuchy` motor-generatory`. Osobly`vi vy`mogy` [DSTU EN IEC 60034-33:2022 Rotating electrical machines – Part 33: Synchronous hydrogenerators including motor-generators – Specific requirements], International Standard, Access mode: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102789 (accessed 20 November 2023).
 - (2009), DSTU EN 10149-1:2009 Vy`roby` zi stali z vy`sokoyu grany`ceyu ply`mosti ploski garyachekatani dlya xolodnogo formozminyuvannya. Chasty`na 1. Zagal`ni umovy` postachannya [DSTU EN 10149-1:2009 Steel products with a higt turnover abroad flat hot-rolled cold forming. Part 1: General delivery conditions (EN 10149-1:1995, IDT)], Access mode: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29426 (accessed 20 November 2023).
 - Yukhymchuk V. D. (2014) *Technology of production of electric machines*, Tim Publishing Group, Kharkiv, Ukraine, 750 p, Access mode: URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/elmash/wp-content/uploads/sites/108/2018/06/Tehnologiya-virobnitstva-elektrichnih-mashin.-Pidruchnik.YUhimchuk-V.D.-2014.pdf> (accessed 20 November 2023).
 - Pickering S. J., Lampard D., Shanel M. (2001), “Modelling ventilation and cooling of the rotors of salient pole machines”, *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Cat. No.01EX485, ISBN 0-7803-7091-0, <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2001.939411>.
 - Traxler-Samek G., Zickermann R., Schwery A. (2010), “Cooling Airflow, Losses, and Temperatures in Large Air-Cooled Synchronous Machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, is. 1, pp. 172–180, <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2031191>.
 - Tretiak O., Kritskiy D., Kobzar I., Arefieva M., Nazarenko V. (2022), “The Methods of Three-Dimensional Modeling of the Hydrogenerator Thrust Bearing”, *Computation*, vol. 10, is. 9, pp. 152, <https://doi.org/10.3390/computation10090152>.
 - Tretiak O., Kritskiy D., Kobzar I., Sokolova V., Arefieva M., Tretiak I., Hromenko D., Nazarenko V. (2022), “Modeling of the Stress–Strain of the Suspensions of the Stators of High-Power Turbogenerators”, *Computation*, vol. 10, is. 11, pp. 191, <https://doi.org/10.3390/computation10110191>.
 - Valavi M., Nysveen A., Nilsen R., Le Besnerais J., Devillers E. (2017), “Analysis of magnetic forces and vibration in a converter-fed synchronous hydrogenerator”, *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA*, <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096018>.
 - Gruboy A. P., Kiryanov A. N. (2004), “Opyt vosstanovitel'nogo remonta mexanicheskoy chasti rotorov gidrogenerato-rov/dvigatel'ey GAE'S «Zharnovec» (Pol'sha) [Experience in restoration repair of the mechanical part of the rotors of hydro-generators/engines of the Żarnowiec PSPP (Poland)]”, *Hydro-power of Ukraine*, no. 1, pp. 30–33, ISSN 1812-9277.
 - Tretiak O., Kritskiy D., Kobzar I., Arefieva M., Selevko V., Brega D., Maiorova K., Tretiak I. (2023), “Stress-Strained State of the Thrust Bearing Disc of Hydrogenerator-Motor”, *Computation*, vol. 11, is. 3, <https://doi.org/10.3390/computation11030060>.

Надійшла (received) 23.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Макаров Павло Миколайович (Makarov Pavlo) – аспірант кафедри аерогідродинаміки Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; м. Харків; тел.: (050) 323-23-66; e-mail: p.makarov_khai@gmx.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6415-8970>.