

Штрибець В.В., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Лісовський С.В.

МОДЕЛЬ І МЕТОД ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СУДНОВИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ СУШІННІ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНА

Метою статті є розробка математичного забезпечення теплового розрахунку суднових синхронних генераторів у рамках прискореної сушки та відновлення систем ізоляції суднового електрообладнання під час суднового ремонту. Поставлена мета досягається шляхом розробки математичної моделі для розрахунків нагріву мокрих обмоток суднових синхронних генераторів при поточній сушці та методу прискореної сушки суднових синхронних генераторів в робочих умовах на судах зі змінним струмом, що регулюється за допомогою універсального тиристорного перетворювача з настроюваною структурою силового клапанного модуля в контурі обмотки збудження. Встановлено, що якість процесу ремонту суден та відновлення електрообладнання, яке було відремонтоване, залежить від технологічних процесів нагрівання, сушіння, відновлення, випробування та ізоляції електрообладнання суден в галузі морського транспорту. Щоб підвищити продуктивність та ефективність судноремонту, необхідно коректно та повністю оцінити технічний стан електрообладнання суден на етапі підготовки до ремонту. При цьому існуючі методи (моделі) аналізу суднових синхронних генераторів при сушінні в умовах експлуатації судна мають відповідні недоліки, тому розробка ефективних моделей та методів сушіння електрообладнання суден з використанням енергозберігаючих технологій є актуальним завданням в суднобудуванні і судноремонті. Запропоноване математичне забезпечення теплового розрахунку суднових синхронних генераторів при сушінні в умовах експлуатації судна містить математичну модель розрахунку нагріву мокрих обмоток суднових синхронних генераторів при струмовій сушці і метод їхньої прискореної сушки в робочих умовах на судах зі змінним струмом, регульованим універсальним тиристорним перетворювачем з регульованою силовою структурою модуля клапана в ланцюзі обмотки збудження. Найбільш суттєвим результатом є сукупність рівнянь, що входять до складу математичного забезпечення теплового розрахунку суднових синхронних генераторів. При цьому економічно вигідно використовувати дане математичне забезпечення як ефективний метод сушіння і відновлення опору вологих обмоток синхронного генератора в умовах зі збільшенням опору ізоляції, оскільки необхідна потужність для сушіння обмоток є порівняно невеликою.

Ключові слова: математичне забезпечення, метод, модель, судновий синхронний генератор, сушка, ізоляція, обмотка, ремонт.

Постановка проблеми. Ефективність та надійність ремонту суден, а також відновленого після ремонту електрообладнання, значно залежать від якісних технологічних процесів забезпечення режимів нагріву, сушіння, відновлення, випробування та ізоляції електрообладнання суден. Щоб підвищити продуктивність та ефективність виробництва в галузі судноремонту, необхідно об'єктивно та повною мірою оцінити технічний стан електрообладнання суден на етапі підготовки до ремонту.

Суднові синхронні генератори (ССГ) – це відповідальне електрообладнання, тому після тривалих зупинок і зимового осідання річкового флоту, їх необхідно масово перевіряти на вологу ізоляцію і підвищувати опір до норм, які встановлені нормативними документами.

Сушка та відновлення опору ізоляції змочених обмоток суднових синхронних генераторів є складнішою процедурою, порівняно з асинхронними двигунами, через необхідність використання потужнішого джерела електроенергії з особливими параметрами. Для синхронних генераторів

великої потужності зазвичай використовують кілька методів сушіння, таких як використання зовнішніх джерел тепла або подача напруги на деякі обмотки генератора. Однак, в умовах експлуатації судна, найефективнішими можуть бути методи, що використовують наявні джерела електроенергії на борту для сушіння та відновлення опору ізоляції вологих обмоток. Ці методи можна успішно застосовувати в умовах експлуатації судна.

Традиційно, в суднобудуванні та судноремонті рекомендується застосовувати метод зовнішнього нагрівання для сушіння обмоток електричних машин зі значенням опору ізоляції менше 50 кОм для обмоток статорів змінного струму та менше 20 кОм для обмоток збудження машин постійного та змінного струму. У процесі сушіння важливо забезпечити проходження нагрітого повітря по тій же траєкторії, що і при існуючій системі охолодження в електричній машині. Однак, для потужних ССГ цей метод може бути складним у реалізації та регулюванні оптимального теплового режиму.

Метод з втратами в станині передбачає намотування намагнічуваної обмотки на статорі ССГ аналогічним чином, як при сушінні асинхронного двигуна під час судового ремонту. Цей метод може бути використаний для ССГ з дуже низьким опором ізоляції, але потребує наявності на судні джерела регульованої низької напруги, розрахованого на великі струми. Крім того, намагнічує обмотка для потужних ССГ повинна бути досить потужною, що збільшує трудомісткість її виготовлення та матеріаломісткість.

Для того, щоб сушити обмотки нерухомих судових генераторів існують два можливих методи. Перший полягає у підключенні однофазного або трифазного джерела струму промислової частоти до обмоток статора, а другий – у підключенні джерела постійного струму до обмотки збудження. Ці методи використовуються для судових генераторів, що перебувають у зібраному стані. Однак, перший метод має певні недоліки, такі як потребу в наявності джерела трифазного змінного струму регульованої напруги, розрахованого на великі струми, що ускладнює його виконання у умовах експлуатації. Крім того, обмотки збудження судових генераторів будуть нагріватися до менших температур, так як нагрівання відбувається опосередковано теплом навколишнього середовища з внутрішньої порожнини електричної машини. У другому методі постійний струм може бути поданий на обмотку збудження судових генераторів від наявного джерела постійного струму – зварювального перетворювача. Цей метод може бути виконаний в умовах експлуатації судна, а також в суднобудуванні і судноремонті. Недоліком другого методу є те, що обмотки статорів мають більш низьку температуру, через її непрямий нагрів.

Оберткові судові синхронні генератори можна також сушити, застосовуючи струмову сушку при симетричному трифазному короткому замиканні в генераторному режимі. Цей метод сушіння забезпечує рівномірний нагрів всіх обмоток ССГ, легко регулюється і може виконуватися в умовах експлуатації на морі. Однак, недоліком цього способу є необхідність тривалої роботи первинного двигуна (дизеля) ССГ з малим навантаженням.

Отже, розглянуті методи (моделі) мають відповідні недоліки, тому розробка ефективних моделей та методів сушіння електрообладнання суден з використанням енергозберігаючих технологій є актуальним завданням в суднобудуванні і судноремонті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час багато публікацій присвячено дослідженням синхронного генератора з використанням у різних галузях.

Наприклад, у статті [1] наведено математичні моделі процесів самокалібрування синхронного генератора з традиційним та двовісним збудженням. Як відомо, самонакачування – це різновид електромеханічної нестійкості генератора, коли його ротор, обертаючись з основною робочою швидкістю при певному значенні кута, проявляє коливальні зміни швидкості і кута зі збільшенням амплітуди аж до виходу з синхронності. В енергосистемі також можуть відбуватися коливальні зміни швидкостей і кутів повороту роторів генераторів з незростаючими амплітудами. Такі зміни відомі як синхронні осцилятори. Самонакачувальні генератори можуть з'являтися з різних причин. З них виділяють три узагальнені причини, а саме наявність великого активного опору в контурі статора, наявність мертвої зони або затримки дії АРВ апарату, неправильна настройка АРВ апарату. Диференціальні рівняння синхронного генератора були вирішені в mathcad методом Коші, результати порівнювалися графічно. Результати показують, що двовісний

синхронний генератор відрізняється від традиційного синхронного генератора тим, що саморозгойдуються перехідні процеси затухають і мають тенденцію швидко вступати в синхронізм.

У роботі [2] наведено результати розробки математичної моделі синхронного двигуна та дослідження впливу ступеня насичення магнітопроводу на перехідні процеси прямого запуску. Зазначено, що існуючі методи дослідження та розрахунку перехідних процесів синхронних машин базуються на застосуванні методу(ів) суперпозиції, що виключає їх використання в нелінійних системах.

У роботі [3] визначено, що синхронний генератор є найважливішим обладнанням у виробництві електроенергії. У даній статті представлена історія синхронного генератора від початку до теперішнього часу. Всі синхронні генератори, включаючи дизельні, газові та парогенератори, використовуються на теплових електростанціях, великі гідравлічні турбіни на гідроелектростанціях, вітрові турбіни на вітрових електростанціях. У схемі заміщення синхронного генератора потрібно знати три значення, щоб передбачити повну поведінку генератора. До цих величин відноситься зв'язок між струмом збудження і магнітний потік, синхронний опір і опір якоря. Синхронні машини можуть працювати в режимах двигуна або генератора. Коли синхронна машина працює на холостому ході і поле збудження знаходиться під контролем, її називають синхронним конденсатором або синхронним компенсатором. Різні втрати в синхронних генераторах включають омичні втрати, втрати активної зони, механічні втрати і втрати збудження.

У статті [4] зазначено, що електричні машини, а особливо синхронні генератори, займають значне місце на електростанціях і в промислових виробничих лініях, і їх позапланові відключення можуть мати дуже негативні наслідки. Одна з основних причин їх виходу з ладу пов'язана зі зношеністю їх систем ізоляції статора і ротора. Хоча існує кілька промислових методів, які зазвичай використовуються для діагностики справності таких деталей, деякі критичні аспекти залишаються невирішеними. У даній статті розглядаються різні діагностичні методи і методи, найбільш часто використовувані на практиці для визначення стану цих двох ізоляційних систем в синхронних генераторах, виділення їх відповідних недоліків і аналіз їх варіантів.

У роботі [5] наводиться оцінка стану синхронної ізоляції статора генератора, що використовується на електростанціях. Робота складається з трьох частин: теоретичної, лабораторних та польових досліджень. У першій частині широко обговорювалася теорія діелектричної ізоляції з використанням різних методів неруйнівного контролю, використовуваних для оцінки стану ізоляції генератора. У лабораторних дослідженнях використані дві природно зволожені асфальтові обмотки статора із слюди: одна з сухої поліефірної слюди, а інша – з сухої епоксидної слюди. Вони були випробувані в умовах сушіння і змочування. Використовуваними методами випробувань є лінійна зміна постійного струму, зміна опору з плином часу, струм поляризації та деполіаризації, частотна діелектрична спектроскопія та випробування частковим розрядом, і між ними встановлено взаємозв'язок. У польових дослідженнях різні генератори, що належать Цейлонській електроенергетичній раді, були протестовані за допомогою лінійного тесту постійного струму. Було встановлено, що лінійний тест постійного струму CHANGE, як легкий і простий польовий тест, може бути ефективно використаний для дослідження впливу вологи на ізоляцію генератора.

У роботі [6] визначено, що порушення ізоляції обмотки синхронного генератора завдають значних пошкоджень і вимагають великих витрат на ремонт. Розуміння поведінки машини під час внутрішніх відмов дуже важливо для повного захисту машини. У роботі розглянуті окремі питання моделювання, аналізу й експериментального випробування синхронних генераторів в умовах внутрішньої відмови. У цій статті узагальнено експериментальний підхід, прийнятий для виявлення цього явища. Вимірювання, проведені в режимі реального часу, дозволили отримати результати, зроблені під час контрольованих внутрішніх несправностей на лабораторному генераторі. Ці дані також порівнювалися з даними, зафіксованими реле безпеки під час розвитку пошкоджень внутрішньої ізоляції генератора.

У статті [7] обговорюються три останні технології високої щільності потужності для генераторів і двигунів, запропонованих для морських застосувань, і наша увага зосереджена на їх проблемах електричної ізоляції. Це високочастотні (швидкодіючі) генератори (від 200 до 400 Гц), надпровідні генератори, а також нові ізоляційні матеріали і системи. Для високошвидкісних генераторів високі втрати в магнітних матеріалах можуть скоротити термін служби ізоляції. Таким чином, ці генератори повинні охолоджуватися водою, а не повітрям. Для надпровідних генераторів найбільш серйозним занепокоєнням є цілісність системи ізоляції при великих теплових флуктуаціях, коли система циклічно переходить між кімнатною температурою і робочою температурою. Обговорюється прискорене старіння ізоляційних систем, особливо в електричних обертових машинах, що піддаються впливу плюсів напруги з високими швидкостями підйому до сотень кВ/мкс і високими частотами повторення від сотень кГц до МГц. Ці імпульси напруги генеруються ширококутовими перетворювачами, передбаченими в архітектурі майбутніх кораблів ВМС США.

У статтях [8-13] досліджується вплив морського середовища, такий як великі коливання температури, висока вологість і сильний сольовий туман на систему ізоляції статора вітрогенераторів, що подібно до морських застосувань. Прискорене випробування на електричні і теплові навантаження, соляний туман і вологість, було розроблено і використано для вивчення старіння зразків, що імітують системи ізоляції, які використовуються у вітрогенераторних установках. Випробувальна напруга являла собою біполярний повторюваний імпульс напругою лише з однією частотою (15 кГц) і однією швидкістю розгортки (12,5 кВ/мкс). Також досліджувалося одне значення вологості (93%) і одне значення концентрації соляного туману. Змінним параметром була кількість циклів випробування. За результатами випробувань встановлено, що зі збільшенням кількості циклів індекс поляризації та початкова напруга зменшуються, а тангенс кута діелектричних втрат зростає. Однак рівень деградації є незначним, і всі згадані діелектричні властивості демонструють часткове відновлення після сушіння. Тобто для розглянутого циклу випробувань вплив навколишнього середовища не спричиняє значної деградації ізоляційного матеріалу. Однак деякі оператори круїзних лайнерів вже зіткнулися з передчасними відмовами у високовольтних обертових механізмах, які зазвичай мають термін служби яких зазвичай становить близько 20 років, однак вони виходять з ладу вже через лише через п'ять років [14].

Але у відомій літературі відсутня інформація щодо дослідження проблем прискореної сушки та відновлення систем ізоляції суднового електрообладнання під час суднового ремонту.

Метою статті є розробка математичного забезпечення теплового розрахунку суднових синхронних генераторів у рамках прискореної сушки та відновлення систем ізоляції суднового електрообладнання під час суднового ремонту.

Викладення основного матеріалу дослідження. Відповідно до поставленої мети в статті розроблено математичне забезпечення теплового розрахунку суднових синхронних генераторів (самозбуджених і безщіткових) при сушінні в умовах експлуатації судна. Пропоноване математичне забезпечення містить:

- математичну модель для розрахунків нагріву мокрих обмоток суднових синхронних генераторів при поточній сушці;
- метод прискореної сушки ССГ в робочих умовах на суднах зі змінним струмом, що регулюється за допомогою універсального тиристорного перетворювача з настроюваною структурою силового клапанного модуля в контурі обмотки збудження.

Отримано математичну модель для оцінки нагріву мокрих обмоток суднових синхронних (самозбуджувальних і безщіткових) генераторів при поточній сушці в експлуатаційних умовах на суднах на основі схеми теплового заміщення (рис. 1). Система рівнянь за цією схемою виглядає так:

$$\begin{cases} \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{1-3}} = P_1; \\ \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{2-3}} = P_2; \\ \frac{\theta_3 - \theta_1}{R_{1-3}} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_{2-3}} + \frac{\theta_3}{R_{3-0}} = P_3; \end{cases} \quad (1)$$

де $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – перевищення температури для обмоток статора, ротора і внутрішньої порожнини машини відповідно, K ;

$R_{1-3}, R_{2-3}, R_{3-0}$ – термічні опори між відповідними частинами машини, а також між внутрішньою порожниною машини та навколишнім середовищем, $K/Вт$;

P_1, P_2, P_3 – потужності, розсіяні відповідно в статорі, роторі і внутрішній порожнині, $Вт$.

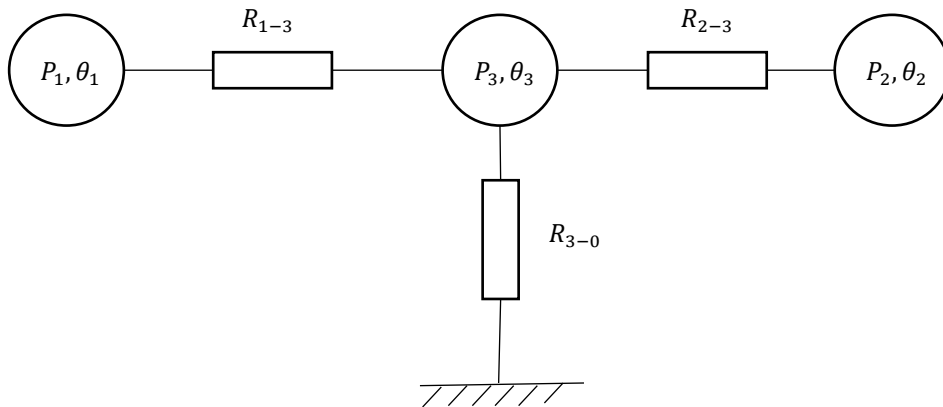


Рисунок 1 – Спрощена теплова схема заміни суднового синхронного генератора

Ця схема заміни ССГ дозволяє достатньо точно оцінити поточні температури під час сушіння. Для системи рівнянь (1) визначено аналітичний вираз:

$$\begin{cases} \theta_1 = P_1 R_{1-3} + \theta_3; \\ \theta_2 = P_2 R_{2-3} + \theta_3; \\ \theta_3 = R_{3-0}(P_1 + P_2 + P_3). \end{cases} \quad (2)$$

Для отримання значень теплових опорів для ССГ різної потужності можна скористатись графіками, що відображають залежність теплових опорів від сумарної потужності S суднових синхронних генераторів.

Аналіз процесу сушіння суднових ССГ під час короткого замикання показав, що на початку сушіння струм у обмотках має становити від 0,2 до 0,4 від номінального, а потім його потрібно збільшувати до значень від 0,5 до 0,7 від номінального. При цьому необхідний струм збудження визначається характеристикою короткого замикання генератора. Однак, недоліком такого способу є те, що дизель має працювати досить тривалий час без навантаження. Особливо складно реалізувати такий спосіб сушіння на шахтних генераторах. Крім того, при сушінні нерухомого ССГ струмом в ланцюзі обмотки збудження обмотка ротора значно більше нагрівається, ніж обмотки статора.

Для проведення теплового розрахунку для двох режимів сушіння застосовуються такі підходи:

- у режимі короткого замикання обертового синхронного генератора;
- для нерухомого синхронного генератора, коли напруга постійного струму подається від пропонуваного універсального тиристорного перетворювача з модулем силового клапана з налаштованою структурою лише в обмотку збудження.

Для покращення ефективності сушіння та відновлення опору ізоляції мокрих обмоток ССГ необхідно враховувати їх параметри, конструкційні особливості та систему охолодження. У статті запропоновано метод прискореної сушки ССГ за допомогою універсального тиристорного перетворювача з настроюваною структурою модуля силового клапана в контурі обмотки збудження. Цей метод використовується для нерухомого синхронного генератора на судах зі змінним струмом і полягає в тому, що на обмотку збудження подається змінний струм, регульований тиристорним перетворювачем з настроюваною структурою модуля силового клапана. Обмотки статора можуть бути розімкнуті. Під час застосування цього методу в синхронному генераторі створюється пульсуюче магнітне поле, вісь якого визначається положенням ротора в свердловині. Струм в обмотці збудження ССГ залежить в основному від індуктивних опорів обмоток збудження, седативної обмотки та обмотки статора.

З метою швидких розрахунків на обчислювальних пристроях параметрів сушіння зволжених обмоток під час експлуатації судна, запропоновано простіші схеми заміни синхронних генераторів (включаючи самозбуджувальні і безщіткові), які мають відкриту обмотку статора і замкнутий короткий колообмін. При цьому індуктивність обмотки збудження визначається за виразом

$$x_f = 2\pi \frac{\mu_0 \tau l W_f^2}{\pi k_\delta k_{pd} \delta p} k_f k_\varphi, \text{ Ом}, \quad (3)$$

де f – частота мережі;

μ_0 – магнітна проникність повітря;

τ, l – поділ полюса і довжина пакета деталі статора, м;

k_{pd} – коефіцієнт насичення магнітопроводу по поздовжній осі;

k_δ – коефіцієнт повітряного просвіту, що визначається за формулами відомих розмірів борозенок і зубів ССГ;

δ – повітряний зазор ССГ, м;

$W_f = 2pW_n$ – кількість витків обмотки збудження;

$2p$ – кількість полюсів;

W_n – кількість витків одного полюса;

k_f – коефіцієнт форми кривої магнітного поля обмотки збудження;

k_φ – коефіцієнт витрати явнополюсної синхронної машини.

Для більшості суднових ССГ немає даних про геометричні розміри магнітного сердечника, а тому необхідно визначати їх за допомогою графіків, що знижує точність розрахунків. Основні розміри явно полярних ССГ можна визначити з графіків рис. 2, в залежності від сумарної потужності на полюс, тобто $S/2p$, а потім визначають індуктивність обмотки збудження за виразом (3).

Морські ССГ мають значно менший повітряний зазор в порівнянні з іншими синхронними машинами, і тому індуктивність розсіювання обмоток збудження $x_{\delta f}$, заспокійливих $x_{\delta \gamma}$ і обмоток статора $x_{\delta \alpha}$ відносно менше, ніж у звичайних синхронних машин. Тому результуюче індуктивний опір ланцюга збудження з урахуванням заспокійливої обмотки з обмоткою розімкнутого статора становить

$$x'_f = x_{\delta f} + \frac{x_f x_{\delta \gamma}}{x_f + x_{\delta \gamma}} \approx (0,13 \dots 0,15) x_f, \text{ Ом}. \quad (4)$$

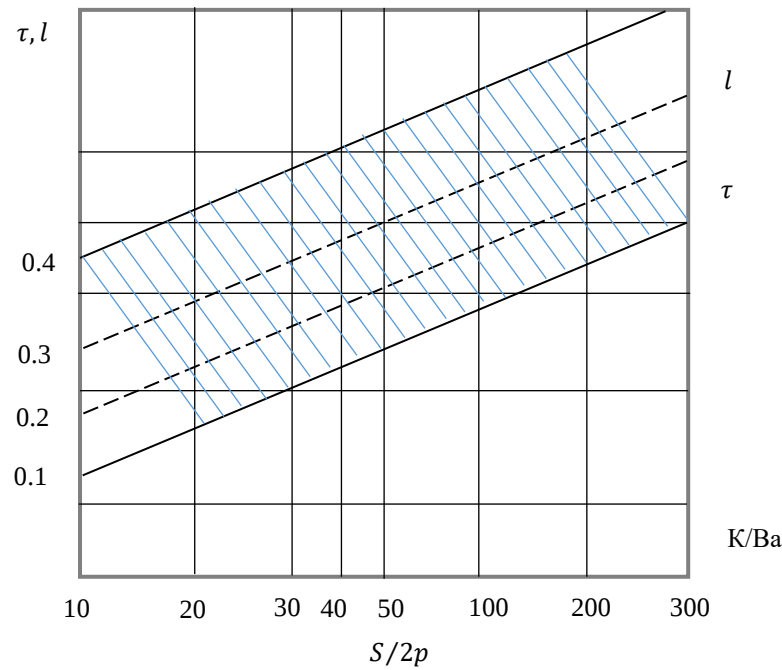


Рисунок 2 – Основні розміри явно полюсних суднових синхронних генераторів для розрахунку параметрів сушіння

У разі короткозамкненою обмотки статора результуючий індуктивний опір від обмотки збудження дорівнює

$$x_f'' = x_{\delta f} + \frac{1}{\frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{\delta \gamma}} + \frac{1}{x_{\delta \alpha}}} \approx (0,85 \dots 0,1)x_f, \text{ Ом.} \quad (5)$$

Активна потужність на стороні мережі визначається активними опорами в обмотках і може бути розрахована за виразами з обмоткою розімкнутого статора

$$P_f' = \frac{U^2}{x_f'} \cos \varphi, \quad (6)$$

і в закритому стані

$$P_f'' = \frac{U^2}{x_f''} \cos \varphi, \quad (7)$$

де U – напруга, що подається на обмотку збудження, В;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності схем заміни з урахуванням активних опорів всіх трьох обмоток ССГ, тобто обмоток збудження, седативного і статора.

Потужність, розсіяну в обмотці статора, можна знайти приблизно як різницю P_f'' і P_f' . При цьому систему рівнянь (2) можна записати у такому вигляді

$$\begin{cases} \theta_1 = (P_f'' - P_f')R_{1-3} + \theta_3; \\ \theta_{12} = P_f'R_{2-3} + \theta_3; \\ \theta_3 = R_{3-0}P_f''. \end{cases} \quad (8)$$

Знаючи втрати в обмотках, можна визначити їх нагрів за формулами (2) і (8).

Запропонований спосіб струмової сушки дозволяє нагрівати обмотки ротора і статора машини досить рівномірно. Недоліком цього методу є малі втрати потужності, так як великий індуктивний опір за формулами (4) і (5) знижує значення струмів в обмотках, які при напрузі $U = 220\text{В}$ складають 0,1 ... 0,2 номіналу. Однак якщо тривалий процес сушіння або відновлення опору ізоляції не важливий, такий спосіб сушіння дуже ефективний, що підтверджено експериментами в умовах експлуатації на судах.

Таким чином, використовуючи формули, які були наведені вище, можна вибрати найбільш підходящий метод сушіння ССГ і розрахувати необхідні струми або напруги для сушіння, а також перевірити, чи не перевищує температура гранично допустимого значення. Для цього напруга промислової частоти, що подається тиристорним перетворювачем на обмотку збудження, не повинна перевищувати 220 В.

В результаті було встановлено, що технологічний процес сушіння систем ізоляції електрообладнання за допомогою переносного універсального тиристорного перетворювача є ефективним, якісним і вимагає значно менших трудовитрат порівняно з традиційними методами.

Висновки. У статті запропоновано математичне забезпечення теплового розрахунку судових синхронних генераторів (самозбуджувальних і безщіткових) при сушінні в умовах експлуатації судна, що включає математичну модель розрахунку нагріву мокрих обмоток судових синхронних генераторів при струмовій сушці і метод прискореної сушки ССГ в робочих умовах на судах зі змінним струмом, регульованим універсальним тиристорним перетворювачем з регульованою силовою структурою модуль клапана в ланцюзі обмотки збудження.

Дане математичне програмне забезпечення, яке є основою ефективного методу сушіння і відновлення опору ізоляції вологих обмоток синхронного генератора, економічно доцільно використовувати в робочих умовах зі збільшенням опору ізоляції, оскільки потужність, що подається на обмотки, порівняно невелика.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mathematical modeling of the self-swinging process of synchronous generators / N. Pirmatov et al. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2612. 050005. URL: doi.org/10.1063/5.0135546 (дата звернення: 06.10.2024).
2. Mathematical model to take into account the influence of saturation of the magnetic circuit on the starting characteristics of a synchronous motor / T. Olimjon et al. *Methodological problems in reliability study of large energy system* : Proceedings of the Rudenko International Conference, 14 December 2020. E3S Web of Conferences. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202021601119 (дата звернення: 06.10.2024).
3. Ehya H., Faiz J. Operation principles, structure, and design of synchronous generators. *Electromagnetic Analysis and Condition Monitoring of Synchronous Generators*. 2022. URL: doi.org/10.1002/9781119636151.ch2 (дата звернення: 06.10.2024).
4. Determination of the Insulation Condition in Synchronous Generators: Industrial Methods and A Case Study / D. Verginadis et al. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2021. Vol. 28(2). P. 67-77. URL: doi.org/10.1109/MIAS.2021.3114659 (дата звернення: 06.10.2024).
5. Fernando M., Jayantha G. Laboratory and Field Investigations of Generator Stator Insulation. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, Sri Lanka. 2011. Vol. 44(2). P. 21-31. URL: doi.org/10.4038/engineer.v44i2.7020 (дата звернення: 06.10.2024).
6. Analysis of synchronous generator internal insulation failures / E.B. Bakie et al. *Electric Machines and Drives* : Proceedings of the IEEE International Conference, San Antonio, TX, USA, 15 May 2005. P. 106-110. URL: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195709> (дата звернення: 06.10.2024).
7. Ghassemi M. High power density technologies for large generators and motors for marine applications with focus on electrical insulation challenges. *High Voltage*. 2020. Vol. 5. P. 7-14. URL: doi.org/10.1049/hve.2019.0055 (дата звернення: 06.10.2024).
8. The effect of the marine environment on the stator insulation system of an offshore wind turbine generator / X. Liu et al. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2015. Vol. 31(3). P. 10-17. URL: doi.org/10.1109/MEI.2015.7089117 (дата звернення: 06.10.2024).
9. Effects of accelerated repetitive impulse voltage aging on performance of model stator insulation of

- wind turbine generator / X.Z. Liu et al. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21(4). P. 1606–1615. URL: [dx.doi.org/10.1109/TDEI.2014.004363](https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004363) (дата звернення: 06.10.2024).
10. Evaluation method of insulation system for wind turbine generator based on accelerated multi-factor ageing test / X.Z. Liu et al. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* : Proceedings of the IEEE Conference, Shenzhen, China, 20–23 October 2013. P. 1506–1515. URL: [dx.doi.org/10.1109/CEIDP.2013.6747073](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2013.6747073) (дата звернення: 06.10.2024).
11. Experimental research on stator insulation system of 5 MW offshore wind turbine generator under simulated marine environments / X.Z. Liu et al. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* : Proceedings of the IEEE Conference, Shenzhen, China, 20–23 October 2013. P. 52–55. URL: doi.org/10.1109/CEIDP.2013.6748199 (дата звернення: 06.10.2024).
12. Study on multi-factor aging characteristics of stator insulation for wind turbine generator / X.X. Ding et al. *Properties and Applications of Dielectric Materials* : Proceedings of the IEEE International Conference, Bangalore, India, 24–28 July 2012. P. 1–4. URL: [dx.doi.org/10.1109/ICPADM.2012.6318939](https://doi.org/10.1109/ICPADM.2012.6318939) (дата звернення: 06.10.2024).
13. Long-term aged performances of stator insulation for wind turbine generator under repeat pulse voltage / X.Z. Liu et al. *Electrical Insulating Materials* : Proceedings of the IEEE International Symposium, Kyoto, Japan, 6–10 September 2011. P. 105–108. URL: doi.org/10.1109/iseim.2011.6826333 (дата звернення: 06.10.2024).
14. Meggs R.W., Daffey K. Partial discharge monitoring in marine HV systems. Institute of Marine Engineering, Science and Technology Event, 2011.

Shtrybets V.V., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Lisovskyi S.V. MODEL AND METHOD FOR THERMAL CALCULATION OF SHIP SYNCHRONOUS GENERATORS DURING DRYING UNDER SHIPBOARD CONDITIONS

The aim of the article is to develop a mathematical support for the thermal calculation of ship synchronous generators within the framework of accelerated drying and restoration of insulation systems of ship electrical equipment during ship repair. This goal is achieved by developing a mathematical model for calculating the heating of wet windings of ship synchronous generators during current drying and a method for accelerated drying of ship synchronous generators under operating conditions on AC ships, which is regulated by a universal thyristor converter with a tunable structure of the power valve module in the field winding circuit. It has been established that the quality of the ship repair process and the restoration of repaired electrical equipment depends on the technological processes of heating, drying, restoration, testing and insulation of electrical equipment of ships in the maritime transport industry. In order to increase the productivity and efficiency of ship repair, it is necessary to correctly and fully assess the technical condition of ship electrical equipment at the stage of preparation for repair. At the same time, the existing methods (models) for analysing ship synchronous generators during drying under shipboard conditions have corresponding shortcomings, so the development of effective models and methods for drying ship electrical equipment using energy-saving technologies is an urgent task in shipbuilding and ship repair. The proposed mathematical support for the thermal calculation of ship synchronous generators during drying in ship operation conditions contains a mathematical model for calculating the heating of wet windings of ship synchronous generators during current drying and a method for their accelerated drying under operating conditions on ships with alternating current, adjustable universal thyristor converter with adjustable power structure of the valve module in the excitation winding circuit. The most significant result is a set of equations that are part of the mathematical support for the thermal calculation of ship synchronous generators. It is economically advantageous to use this mathematical support as an effective method of drying and restoring the resistance of wet windings of a synchronous generator in conditions with an increase in insulation resistance, since the required power for drying the windings is relatively small.

Key words: mathematical support, method, model, ship synchronous generator, drying, insulation, winding, repair.