

Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Прістуна С.В., Пастух О.В., Голубєва С.М.

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН СУДНОВИХ ГРЩ

У статті виконано моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових головних розподільчих щитів. Дослідження в значній мірі пов'язане з питаннями надійної передачі електроенергії великої потужності в суднових електроенергетичних системах. В роботі розглянуто доцільність застосування струмопровідних шин замість силових кабелів на окремих ділянках трас головного струму, а також переваги струмопровідних шин з електролітичної міді при їх використанні в суднобудуванні. Наведено математичні вирази для перевірки струмопровідних мідних шин на термічну стійкість аналітичними методами, а також для вибору перерізу струмопровідних шин по допустимому тривалому струму. Створено просторову геометричну, кінцево-елементу та візуалізовану фізичну модель однополосних струмопровідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм, які розміщено одна відносно одної широкими сторонами та за допомогою спеціального керамічного кріплення змонтовано на сталевих прямокутних основах. Візуалізована фізична модель містить в собі інформацію про основні фізичні властивості електротехнічних матеріалів, які використовуються в просторовій моделі та є необхідними для проведення розрахунку. З використанням чисельного методу розрахунку отримано картини розподілу основних електричних і теплових величин при граничного допустимому тривалому струмі величиною 2950 А: електричного потенціалу, густини струму, теплового потоку, густини теплового потоку, резистивного нагріву та температури. Побудовано функціональну залежність температури від сили струму, що протікає через однополосні струмопровідні мідні шини прямокутного перерізу 120×10 мм в діапазоні струму від нуля до 3000 А з урахуванням розсіювання утворюваного тепла з зовнішніх поверхонь струмопровідних шин в оточуюче середовище за рахунок вільної конвекції і теплового випромінювання. Показано переваги використання чисельного методу розрахунку при вирішенні польових задач суднової електроенергетики.

Ключові слова: моделювання, стаціонарне теплове поле, струмопровідні шини, головний розподільчий щит, суднова електроенергетична система, температурний нагрів.

Постановка проблеми.

Необхідність надійної передачі електроенергії великої потужності в суднових електроенергетичних системах зумовлює прокладання багаточисельних кабелів, що паралельно вмикаються на фазу або полюс [1-4]. В силових мережах постійного та змінного струму, в тому числі в системах електроруху, кількість таких кабелів досягає в деяких випадках декількох десятків. Через це виникає потреба використання громіздких за своїми габаритами пристроїв струмозбірних або полюсних шин. Розміщення кабельних

трас стає також достатньо складним. Тому замість кабелів на окремих ділянках трас головного струму, наприклад, між генераторами та їх щитами, між генераторами та головними розподільчими щитами (ГРЩ), між секціями ГРЩ, між щитом електроруку і гребними електродвигунами і т.п., доцільно застосовувати струмопровідні шини. За деякими даними маса струмопроводів в порівнянні з кабелями знижується в середньому на 60 % при застосуванні мідних струмопровідних шин і на 82 % при алюмінієвих шинах. При цьому вартість струмопроводів зменшиться в середньому на 15 і 27 % відповідно. Зниження маси трас досягається за рахунок виключення ізоляції кабелів, зменшення перерізу струмопроводів, оскільки струмопровідні шини в порівнянні з кабелями дозволяють значно збільшити густину струму, а також за рахунок зменшення маси кріпильних конструкцій. Крім того, застосування струмопровідних шин значно полегшує монтажні роботи на судні, тому що основний об'єм робіт по їх виготовленню відбувається в цеху. В практиці суднобудування найбільш простими та поширеними є струмопровідні шини прямокутного перерізу, які відносно прості у виготовленні. Зважаючи на передачу великого потоку електроенергії і велику густину струму через струмопровідні шини значний інтерес представляє наочна візуалізація електротеплових процесів в них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні опубліковано значну кількість вагомих наукових досліджень, які стосуються струмопровідних шин розподільчих пристроїв електроенергетичних систем. Особлива увага приділена конструктивному виконанню струмопровідних шин, їх перевірці на термічну та електродинамічну стійкість, а також розрахунку втрат електроенергії при електропередачі по ним. Аналіз деяких з цих досліджень наведено нижче.

Опис конструкцій основного електрообладнання електростанцій і підстанцій, а також вибір електрообладнання струмопровідних частин головних розподільчих щитів, в тому числі струмопровідних шин і силових кабелів детально викладено в роботах [1-4] та в інших.

Розрахунок основних параметрів жорстких струмопровідних шин розподільчих пристроїв високої та надвисокої напруги, а також застосування сучасних шинотримачів у конструкціях з жорсткими струмопровідними шинами розглянуто в роботах [5; 6].

Дослідження взаємодії динамічних систем з джерелами присвячена робота [7], в ній наведено модель енергетичних потоків дизель-електричного комплексу.

В роботі [8] сформульовано критерій оцінки ефективності передачі потужності у судовому пропульсивному комплексі з малообертовим дизелем і трифазним частотним керуванням асинхронним двигуном.

Особливості техніки і електрофізики високих напруг проаналізовано в [9; 10], в тому числі електрофізичні основи техніки високих напруг, високовольтні ізоляційні конструкції, перенапруги в електричних мережах, питання електромагнітної сумісності.

Слід зазначити, що особливий інтерес представляють питання наочної демонстрації і візуалізації складних електричних і теплових процесів, що відбуваються в струмопровідних шинах головних розподільчих пристроїв судової електроенергетичної системи в різних експлуатаційних режимах роботи, з використанням чисельних методів розрахунку на основі мультифізичних моделей.

Мета дослідження полягає в моделюванні стаціонарного теплового поля струмопровідних шин судових головних розподільчих щитів для візуалізації електричних і теплових процесів, що відбуваються в них при допустимих тривалих струмових навантаженнях.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Для сучасних суден з енергоємним електричним обладнанням важливу роль відіграє надійна передача електроенергії від судових електрогенераторів до споживачів [1]. Струми, які доводиться передавати в одному напрямку можуть досягати 2000-5000 А при високих електричних напругах. Термічна стійкість струмопровідних шин судових ГРЩ вважається прийнятною, коли вони витримують без ушкоджень теплову впливи струмів короткого замикання. Гранично допустимою температурою при короткочасному нагріві для струмопровідних мідних шин судових ГРЩ при струмах короткого замикання прийнято вважати температуру рівну 300 °С. Гранично допустимою температурою нагріву струмопровідних шин при тривалій роботі є температура рівна 70 °С.

Струмопровідні шини вважаються термічно стійкими, якщо їх температура при короткому замиканні залишається нижчою допустимої температури, тобто виконується умова [11]:

$$t_{кз} \leq t_{кз.доп}, \quad (1)$$

де $t_{кз}$, $t_{кз.доп}$ – кінцева (найбільша) і допустима (короткочасна) температури струмопровідних шин при короткому замиканні, °С.

Найбільшу температуру струмопровідних шин при струмах короткого замикання можна визначати за довідковими кривими, попередньо розрахувавши інтеграл Джоуля:

$$B_k = I_{п0}^2 \left(t_{відкл} + T_a \left(1 - e^{-2t_{відкл}/T_a} \right) \right), \quad (2)$$

де $I_{п0}$ – діюче значення періодичної складової струму в початковий момент короткого замикання, кА;

T_a – постійна часу затухання аперіодичної складової струму короткого замикання, що в значній мірі визначається номінальною напругою розподільчого пристрою, с;

$t_{відкл}$ – час відключення при короткому замиканні, який складається з часу дії резервного струмового захисту $t_з$ і повного часу відключення електричного кола вимикачем $t_{п.в.}$ з урахуванням часу гасіння дуги, с.

Початкова температура збірних струмопровідних шин обчислюється в результаті розв'язку трансцендентного рівняння теплового стану струмопровідної шини в робочому режимі з використанням комп'ютерних обчислювальних засобів або приблизно за формулою:

$$t_{п} \approx t_{пов} + (t_{доп} - t_{пов.ном}) \left(\frac{I_{роб.ном}}{I_{доп}} \right)^2, \quad (3)$$

де $t_{пов.ном}$ – номінальна температура повітря, що рівна 40 °С, °С;

$t_{пов}$ – фактична температура струмопровідної шини в робочому режимі, яка з запасом може бути прийнята рівною температурі $t_{пов.ном}$, °С;

$t_{доп}$ – тривало допустима температура струмопровідної шини в робочому режимі, °С;

$I_{роб.ном}$, $I_{доп}$ – найбільший робочий струм шини і тривало допустимий робочий струм відповідно, А.

Перевірку струмопровідних шин судових ГРЩ на термічну стійкість проводять по усталеному струму короткого замикання та приведеному часу дії цього струму.

Мінімальний переріз s [мм²] струмопровідних мідних шин суднових ГРЩ за термічною стійкістю при розрахунках можна оцінити за наступним виразом

$$s \approx \alpha I_{\infty} \sqrt{t_{\Pi}}, \quad (4)$$

де I_{∞} – усталений струм короткого замикання, А;

t_{Π} – приведений час короткого замикання, с;

$\alpha = 6$ – коефіцієнт термічної стійкості для міді.

В загальнопромисловій електроенергетиці використовуються мідні, алюмінієві та сталеві струмопровідні шини [1-4]. Алюмінієві шини цінують за більш привабливу ціну і легкість металу, проте в довготривалій перспективі мідні шини стануть економічно обґрунтованим рішенням. Струмопровідні шини з кольорових металів в порівнянні зі сталевими шинами є більш термічно стійкими до впливів високих і низьких температур. При однакових перерізах струмопровідна мідна шина витримує у відсотковому співвідношенні більше навантаження, ніж алюмінієва або стальва такого ж розміру. Також, мідні шини зводять до мінімуму втрати енергії при передачі, вони високоеластичні та стійкі до розтягування. Струмопровідні мідні шини легко вигинаються, не втрачаючи при цьому своїх технічних властивостей. Це дозволяє збирати розподільчі та силові установки менших розмірів. Через велику кількість переваг та свою надійність в суднобудуванні перевагу надають струмопровідним шинам, що виготовлені з електролітичної міді.

В дослідженні розроблено просторову геометричну модель (рис. 1, а), що складається з трьох однополосних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм, які розміщено одна відносно одної широкими сторонами та за допомогою спеціального керамічного кріплення змонтовано на сталевих прямокутних основах 635×55 мм товщиною 10 мм. Довжина прольоту шин становить $l = 1,85$ м, а відстань між шинами $a = 165$ мм.

Рішення польових задач суднової електроенергетики аналітичними методами ускладнюється представленням реальних процесів за допомогою математичного апарату у вигляді диференціального або інтегрального рівняння, системи диференціальних або інтегро-диференціальних рівнянь [12]. Трудомісткість розв'язку цих рівнянь деяким чином адаптується лише за рахунок використання певних допущень, що призводить з однієї сторони до певного спрощення математичної моделі, проте з іншої ставить питання коректності розв'язку і залежить від правильності цих допущень.

Чисельні методи для вирішення польових задач суднової електроенергетики мають ряд переваг: можливість розрахунку математичної моделі реального процесу зі складною геометрією; можливість розв'язування більш реальних математичних моделей, якими моделюється явище або процес, тобто розв'язування нелінійних диференціальних, систем диференціальних рівнянь в часткових похідних, інтегральних рівнянь.

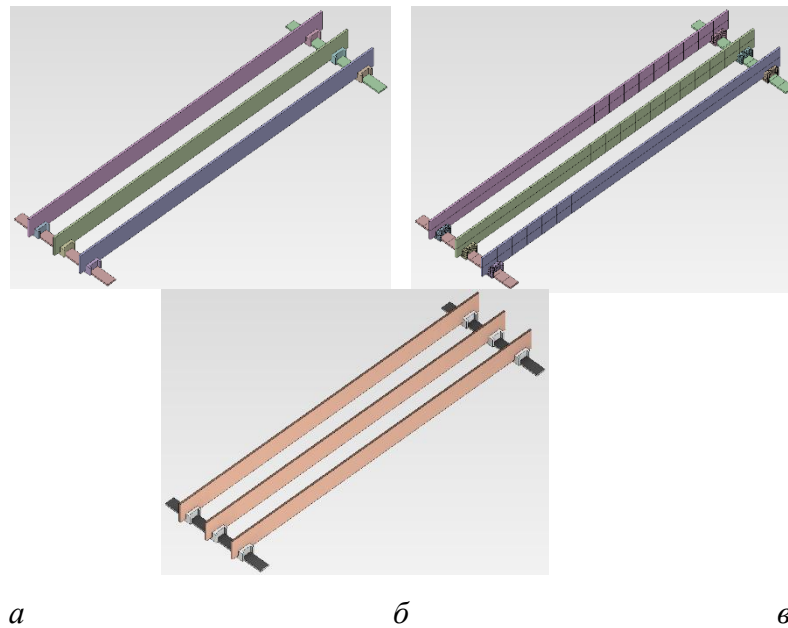


Рисунок 1 – Геометрична (а), кінцево-елементна (б) та візуалізована фізична (в) модель однополосних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм

Зважаючи на вищесказане, в даній роботі рішення отримано з використання чисельного методу розрахунку на основі створеної просторової моделі (рис. 1, б). Результати рішення розглянутої задачі з розподіленими параметрами електричних і теплових полів однополосних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм з урахуванням розсіювання теплоти в оточуюче середовище за рахунок вільної конвекції та теплового випромінювання [13; 14] наведено на рис. 2-4.

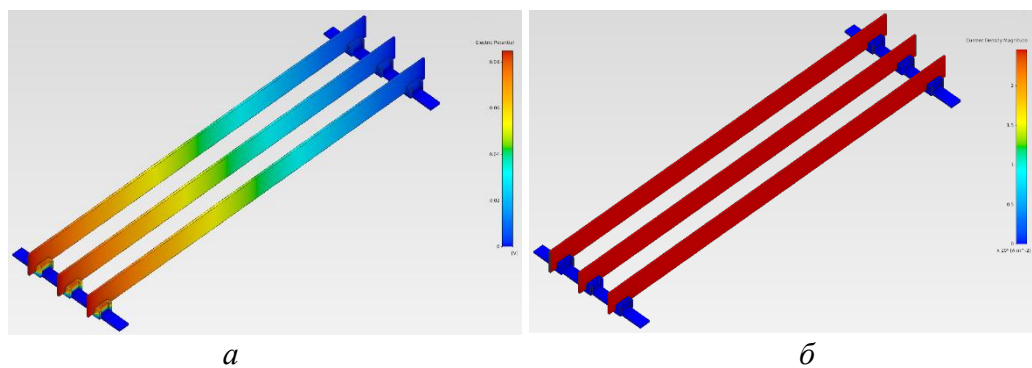


Рисунок 2 – Розподіл електричного потенціалу ϕ [В] (а) та густини електричного струму j [А/м²] (б) по однополосним струмопровідним мідним шинам прямокутного перерізу 120×10 мм при допустимому тривалому струмі 2950 А

При проведенні розрахунку в якості граничних умов прийнято, що температури нижніх поверхонь сталевих основ рівні температурі оточуючого середовища 20 °С (рис. 3, а-з), а торцеві поверхні струмопровідних шин, що розташовані праворуч (рис. 2, а), мають нульовий потенціал 0 В. За довідковими даними максимально допустимими тривалими струмами для мідних однополосних шин прямокутного перерізу 120×10 мм є змінний струм величиною 2650 А та постійний струм величиною 2950 А.

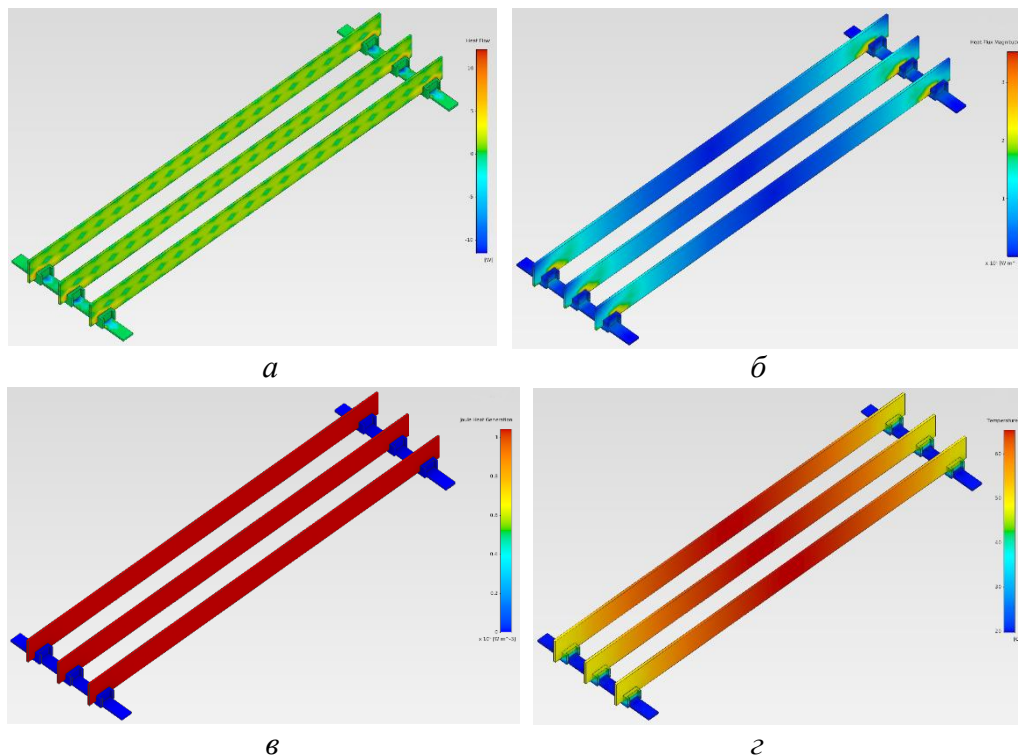


Рисунок 3 – Результати моделювання стаціонарного теплового поля однополюсних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм при допустимому тривалому струмі 2950 А з урахуванням розсіювання теплоти в оточуюче середовище:

a – розподіл теплового потоку Q [Вт]; *б* – розподіл густини теплового потоку Φ_q [Вт/м²]; *в* – розподіл резистивного нагріву J [Вт/м³]; *г* – розподіл температури t [°С]

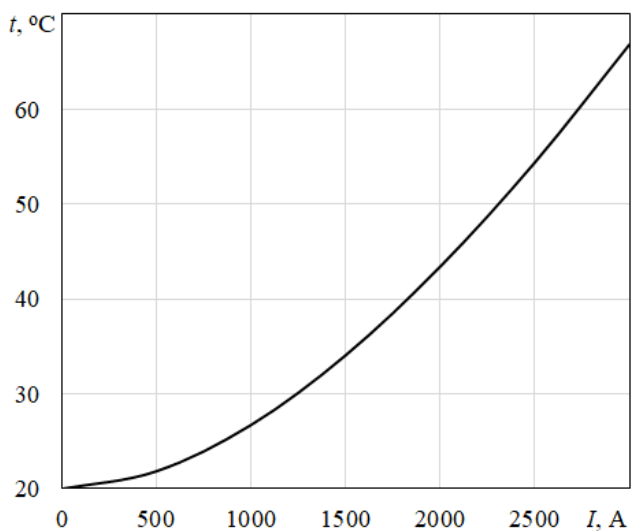


Рисунок 4 – Функціональна залежність $t(I)$ температури t від сили струму I однополюсних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм

випромінювання показані на рис. 4.

З рис. 3, *г* можна зробити висновок про відносну рівномірність стаціонарного теплового поля по струмопровідним шинам, деяка нерівномірність спостерігається лише в місцях кріплення струмопровідних шин і пояснюється теплопровідністю через наявні теплові містки в місцях їх кріплення до сталевих основ.

Графік залежності $t(I)$ температури t від сили струму I , що протікає через струмопровідні мідні шини прямокутного перерізу 120×10 мм, при його варіаціях від 0 до 3000 А з урахуванням розсіювання утворюваного тепла з зовнішніх поверхонь струмопровідних шин в оточуюче середовище за рахунок вільної конвекції і теплового

Встановлено, що при максимально допустимому тривалому струмі 2950 А для розглянутих струмопровідних шин температура нагріву становить приблизно 65 °С, що не перевищує гранично допустиму температуру нагріву шин 70 °С при тривалій роботі.

Висновок. В роботі з використанням чисельного методу розрахунку виконано моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових головних розподільчих щитів, що дало змогу візуалізувати складні електричні та теплові процеси, які відбуваються в них при допустимих тривалих струмових навантаженнях. Результати представлено в графічній формі для розподілу теплового потоку Q , густини теплового потоку Φ_q , резистивного нагріву J та температури t по струмопровідним мідним шинам. Встановлено температурні режими роботи однополосних струмопровідних мідних шин прямокутного перерізу 120×10 мм, при допустимому тривалому струмі 2950 А температурний нагрів становить приблизно 65 °С, що не перевищує гранично допустимого значення. Подальші дослідження будуть спрямовані на моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових головних розподільчих щитів при ударних струмах короткого замикання та з урахуванням електродинамічних навантажень, що ними викликаються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бруслиновский Б.В. Электроэнергетические системы судов с электродвижением / Б.В. Бруслиновский, Л.Н. Токарев, В.Н. Шелудько // Под ред. проф. Л.Н. Токарева. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 343 с.
2. Рожкова Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
3. Усов С.В. Электрическая часть электростанций Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании / С.В. Усов, Б.Н. Михалев, А.К. Черновец, Е.Н. Казеветтер, В.В. Кантан. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616 с.
4. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
5. Долин А.П. Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений / А. П. Долин // Электрические станции. – М.: Энергопрогресс, 2005. – № 4. – С. 49-53.
6. Долин А.П. Применение современных шинодержателей в отечественных конструкциях жесткой ошиновки / А. П. Долин, Л. Е. Егорова // Электроэнергия. Передача и распределение. – М.: ООО «Кабель», 2012. – № 4(13). – С. 64-69.
7. Злакоманов В.В. Взаимодействие динамических систем с источниками энергии / В.В. Злакоманов, Б.С. Яковлев. – М.: Энергоиздат, 1980. – 176 с.
8. Будашко В.В. Оцінка ефективності передачі потужності в суднових дизель-електричних комплексах / В.В. Будашко // Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник. – 2007. – № 18. – Одеса: ОНМА. – С. 21-24.
9. Бржезицький В.О. Техніка і електрофізика високих напруг / В.О. Бржезицький, А.В. Ісакова, В.В. Рудаков та ін. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 930 с.

10. Василець С.В. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання] / С.В. Василець, К.С. Василець. – Рівне: НУВІПІ, 2018. – 187 с.
11. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под. общ. ред. А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
12. Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР / Ж.-К. Сабоннадьер, Ж.-Л. Кулон // Пер. с франц. В.А. Соколова, М.Б. Блеер, под ред. Э.К. Стрельбицкого. – М.: Мир, 1989. – 190 с.
13. Кириченко О.С. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю / О.С. Кириченко, В.І. Костюченко, Д.О. Захаров // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК : науково-технічний журнал. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. – № 1 (6). – С. 60-63.
14. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

REFERENCES

1. Bruslinovsky B.V. Electric power systems of ships with electric propulsion / B.V. Bruslinovsky, L.N. Tokarev, V.N. Sheludko // Ed. prof. L.N. Tokarev. – SPb.: Publishing house of ETU "LETI", 2016. – 343 p.
2. Rozhkova L. D. Electrical equipment of stations and substations / L.D. Rozhkova, V.S. Kazulin. – М.: Energoatomizdat, 1987. – 648 p.
3. Usov S.V. Electrical part of power plants Optimal control of propulsion electric motors of electric ships during reversing / S.V. Usov, B.N. Mikhalev, A.K. Chernovets, E.N. Kazevetter, V.V. Kantan. – L.: Energoatomizdat, 1987. – 616 p.
4. Neklepaev B.N. Electrical part of power plants and substations: Reference materials for course and diploma design / B.N. Neklepaev, I.P. Kryuchkov. – М.: Energoatomizdat, 1989. – 608 p.
5. Dolin A.P. Calculation of the electrodynamic resistance and other parameters of the rigid busbar of the outdoor switchgear of high and ultrahigh voltages / A.P. Dolin // Electric stations. - М.: Energoprogress, 2005. – No. 4. – S. 49-53.
6. Dolin A.P. The use of modern tire holders in domestic structures of rigid busbars / A. P. Dolin, L. E. Egorova // Electricity. Transmission and distribution. – М.: ООО "Cable", 2012. – No. 4 (13). - S. 64-69.
7. Zlakomanov V.V. Interaction of dynamic systems with energy sources / V.V. Zlakomanov, B.S. Yakovlev. - М.: Energoizdat, 1980. – 176 p.
8. Budashko V.V. Evaluation of the efficiency of the transmission of force in ship diesel-electric complexes / V.V. Budashko // Ship power plants: Science and technology collection. - 2007. - No. 18. – Odessa: ONMA. – P. 21-24.
9. Brzhezitskiy V.O. Technics and electrophysics of high springs / V.O. Brzhezitskiy, A.V. Isakova, V.V. Rudakov and I. – Kharkiv: NTU "KhPI" - Tornado, 2005. – 930 p.
10. Vasilets S.V. Technique of high spirits: a master book [Electronic vidannya] / S.V. Vasilets, K.S. Vasilets. – Рівне: НУВІПІ, 2018. – 187 p.
11. Handbook on power supply and electrical equipment: 2 vol. Т. 1. Power supply / Under. total ed. A.A. Fedorov. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 568 p.
12. Sabonnadier J.-C. Finite element method and CAD / J.-C. Sabonnadier, J.-L. Pendant // Per. with French V.A. Sokolova, M.B. Blair, ed. E.K. Strelbitsky. – М.: Mir, 1989. – 190 p.

13. Kirichenko O.S. Model of stationary thermal fields of conductive tires with a special profile / O.S. Kirichenko, V.I. Kostyuchenko, D.O. Zakharov // Energy and computer-integrated technologies in the agro-industrial complex: scientific and technical journal. – Kharkiv: KhNTUSG im. Petra Vasilenka, 2017. – No. 1 (6). – P. 60-63.

14. Filippov I.F. Heat exchange in electrical machines / I.F. Filippov. – L .: Energoatomizdat, 1986 . – 256 p.

Taranenko S.V., Kirichenko O.S., Kolesnik V.V., Kostyuchenko V.I., Pristupa S.V., Pastukh O.V., Golubeva S.M.

MODELING OF STATIONARY THERMAL FIELD OF CURRENT CONDUCTIVE BUSBARS OF SHIPS MAIN SWITCHBOARDS

The article simulates the stationary thermal field of conductive busbars of ship's main switchboards. The research is largely related to the issues of reliable transmission of high-power electricity in ship power systems. The work considers the feasibility of using conductive busbars instead of power cables in some sections of the main current routes, as well as the advantages of conductive busbars made of electrolytic copper when used in shipbuilding. Mathematical expressions for checking current-carrying copper busbars for thermal stability by analytical methods, as well as for choosing the cross-section of current-carrying busbars for the allowable long-term current are given. The spatial geometric, finite element and visualized physical model of single-lane current-carrying busbars of rectangular cross-section 120×10 mm were created. The single-lane current-carrying busbars are placed relative to each other on wide sides and mounted on steel rectangular bases with the help of special ceramic fasteners. The visualized physical model contains information about the basic physical properties of electrical materials used in the spatial model and are necessary for the calculation. Using the numerical calculation method, pictures of the distribution of the main electrical and thermal quantities at the maximum allowable long-term current of 2950 A are obtained: electric potential, current density, heat flow, heat flux density, resistive heating and temperature. The functional dependence of the temperature on the current flowing through single-strip conductive copper busbars of rectangular cross-section 120×10 mm in the current range from zero to 3000 A was constructed, taking into account the dissipation of the generated heat from the outer surfaces of the busbars into the environment due to free convection and thermal radiation. The advantages of using the numerical method of calculation in solving field problems of marine electric power are shown.

Keywords: modeling, stationary thermal field, conductive busbars, main switchboard, ship power system, temperature heating.