

УДК 629.1.04:621.316.351

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/50>**Тараненко С.В.**

Національний транспортний університет

Кириченко О.С.

Національний транспортний університет

Чередник В.М.

Національний транспортний університет

Колесник В.В.

Національний транспортний університет

Прістуна С.В.

Національний транспортний університет

Пастух О.В.

Національний транспортний університет

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ІЗОЛЯТОРІВ І СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН СУДНОВОГО ГРЩ В РЕЖИМІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

В роботі проведена оцінка електродинамічної стійкості композитних ізоляторів SM76 і мідних струмопровідних шин прямокутного та квадратного поперечного перерізу в судовому головному розподільчому щиті (ГРЩ) з урахуванням їх монтажного положення в режимі трифазного короткого замикання. Аналіз проводився для трифазної конструкції головного розподільчого щита з конфігурацією: одна струмопровідна шина на фазу, що є типовим рішенням для судових електроенергетичних систем середньої потужності. Струмопровідні шини трьох фаз розташовані в один ряд по горизонтальній для простоти монтажу та менших вимог до простору в судових умовах. Розглядаються судові електромережі з мідними шинами, що, на відміну від берегових, мають вищі вимоги до провідності та стійкості до корозії. Наведено основні математичні рівняння, що можуть бути використані при описі електричних і механічних процесів у струмопровідних шинах при трифазному короткому замиканні.

При трифазному короткому замиканні за умов однорядного розміщення шин фаз А, В, С виникають електродинамічні сили, напрямки яких визначаються розташуванням шин і миттєвими напрямками струмів. Через фазовий зсув 120° у різні моменти часу шини можуть притягуватися або відштовхуватися. Притягання виникає при однакових напрямках струмів (електродинамічне зближення), відштовхування – при протилежних. У перші мілісекунди після короткого замикання діє ударний струм $i_{уд}$, який характеризується максимальною амплітудою та створює найбільше електродинамічне навантаження. Саме в цей момент електродинамічні сили можуть досягати критичних значень, що потенційно загрожує пошкодженням шин або їхніх кріплень.

Розрахунок електродинамічної стійкості струмопровідних шин передбачав визначення моменту інерції і моменту опору поперечного перерізу, частоти власних коливань, максимального напруження в шинах, максимального навантаження на ізолятори. Для реалізації розрахунку було розроблено його алгоритм, побудовано відповідну блок-схему та створено програму з використанням одного з найпоширеніших інструментів технічного програмування – Python. Розглянуто чотири приклади застосування розрахункового алгоритму для мідних струмопровідних шин прямокутного 100×10 мм і квадратного 30×30 мм перерізу при довжині прольоту між ізоляторами – 1 м і ударному струмі – 40 кА з різними відстанями між центрами шин і врахуванням типу монтажу для прямокутних шин.

Ключові слова: електродинамічна стійкість, ізолятори, струмопровідні шини, трифазне коротке замикання, судовий ГРЩ.

Постановка проблеми. У режимах коротких замикань в ізоляторах і струмопровідних шинах суднового головного розподільчого щита (ГРЩ) утворюються значні електродинамічні навантаження, що можуть призвести до деформації або руйнування. При цьому існуючі нормативні методики не завжди дозволяють належним чином врахувати вплив просторового положення та тип монтажу шин на напружено-деформований стан конструкції. Розгляд критеріїв оцінювання надійності та безпеки в аварійних режимах для судових ГРЩ ускладнюється, враховуючи обмежений простір, властивий водному транспорту. В зв'язку з цим важливим є аналіз електродинамічної стійкості ізоляторів і струмопровідних шин прямокутного перерізу з урахуванням їх монтажного положення та конструктивного кріплення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом активно досліджуються питання роботи судових електроустановок в аварійних режимах, наприклад у разі коротких замикань, що можуть спричинити руйнування ізоляції, перегрів, займання, збій в роботі як берегового, так і суднового електрообладнання. Питання оцінки електродинамічної стійкості судових шинопроводів тісно пов'язані з математичним описом процесів перебігу короткого замикання [1–3] в системах електропостачання [4]. Вимоги до конструктивного виконання судових систем, зокрема до елементів електропостачання та їх стійкості до дії аварійних режимів розглянуто в [5]. Правила улаштування електроустановок [6] є основним нормативним документом, що регламентує вимоги до безпечної та надійної експлуатації електроустановок, у тому числі в умовах коротких замикань. ДСТУ EN 61534-1:2019 [7] встановлює загальні технічні вимоги до систем шинопроводів, що мають особливе значення в забезпеченні надійності електропостачання у складних технічних умовах, зокрема в морському середовищі. ДСТУ ІЕС 60909-4:2008 [8] містить методики та приклади розрахунку струмів короткого замикання в трифазних системах, що є критично важливими для аналізу аварійних режимів у судових електроенергетичних системах.

Проведений аналіз публікацій, нормативних документів і стандартів показує, що питання електродинамічних процесів в ізоляторах і струмопровідних шинах при коротких замиканнях у судовому ГРЩ розкрито не в повній мірі, зокрема щодо програмної реалізації в сучасних

середовищах програмування для створення автоматизованих розрахунків електродинамічної стійкості.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз електродинамічної стійкості композитних ізоляторів і струмопровідних шин прямокутного та квадратного поперечного перерізу в судовому ГРЩ з урахуванням їх монтажного положення в режимі трифазного короткого замикання, а також розробка алгоритму розрахункового моделювання та його програмна реалізація.

Виклад основного матеріалу. Аналіз процесів у сучасних опорних композитних ізоляторах і струмопровідних шинах судового ГРЩ у режимі трифазного короткого замикання [1–4] повинен враховувати: електричні процеси в шинах за RL -моделлю; електродинамічні сили; деформаційну реакцію шин як гнучкої механічної системи; оцінку міцності ізоляторів на електродинамічне навантаження. Система диференціально-алгебраїчних рівнянь з обмежувальною умовою міцності, що описує ці процеси, має наступний вигляд:

$$\begin{cases} L \frac{dI_k(t)}{dt} + RI_k = U_k(t), k = A, B, C; \\ F_{ij}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_i(t)I_j(t)}{d_{ij}} l, i \neq j; \\ \rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = f(x,t); \\ \frac{F(t)}{2} \leq \sigma_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (1)$$

У дослідженні розглядаються два варіанти монтажного положення шин прямокутного перерізу: вертикальне («реброве положення») та горизонтальне («площинне положення»). Усі струмопровідні шини розташовані в одній площині з однаковою міжфазною відстанню. Фрагмент судового ГРЩ з композитними ізоляторами SM76 (поліамід) і мідними шинами прямокутного перерізу при розташуванні у ребровому (а) та площинному (б) положенні показано на рис. 1.

Струм у фазах при короткому замиканні визначається виразом:

$$L \frac{dI_k(t)}{dt} + RI_k = U_k(t), k = A, B, C, \quad (2)$$

де I_k – струм у фазі k , А;

L – індуктивність шини, Гн;

R – активний опір, Ом;

$U_k(t)$ – напруга в момент короткого замикання, В.

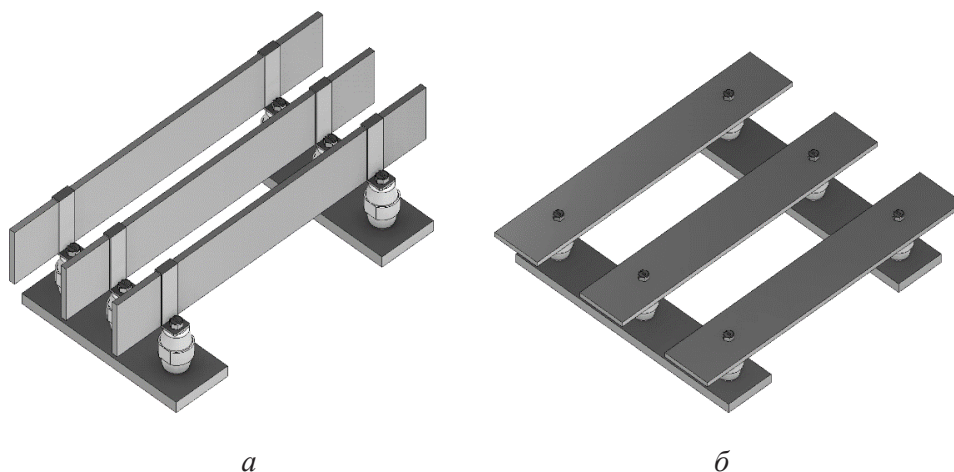


Рис. 1. Ділянка трифазного шинопроводу суднового ГРЩ з композитними ізоляторами SM76 та мідними струмопровідними шинами прямокутного перерізу при розташуванні у вертикальному ребровому (а) та горизонтальному площинному (б) положенні

У реальності напруга під час короткого замикання не миттєво падає до нуля, оскільки формується перехідний процес з дуговим розрядом, де можуть бути короточасні перенапруги, але в сталому режимі короткого замикання напруга в точці замикання зменшується до нульового значення. Перше рівняння системи (1) визначає, який струм протікає через шини, оскільки саме він формує електродинамічну силу, що спричиняє деформацію.

Електродинамічна сила $F_{ij}(t)$ між струмопровідними шинами фаз i та j розраховується за допомогою алгебраїчного рівняння, яке визначає миттєву силу взаємодії між паралельними шинами, по яких протікають струми:

$$F_{ij}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_i(t)I_j(t)}{d_{ij}} l, i \neq j, \quad (3)$$

де $I_i(t), I_j(t)$ – струми в шинах, А;

d_{ij} – відстань між шинами, м;

l – довжина прольоту між ізоляторами (відстань між опорами), м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала, Гн/м.

Сума всіх $F_{ij}(t)$ дає результуючу силу $F(t)$, яка потім використовується в третьому рівнянні системи для механічної деформації струмопровідних шин.

Класичне рівняння Ейлера-Бернуллі для прогину балки, що враховує як інерційні ефекти, так і жорсткість прольоту:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} = f(x, t), \quad (4)$$

де $\rho A \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}$ – перший доданок для інерційної складової (закон Ньютона для розподіленої маси балки);

$EJ \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4}$ – другий доданок, що описує опір деформації, який визначає жорсткість балки (реакція на викривлення);

ρ – густина матеріалу, кг/м³ (для міді $\rho_{Cu} \approx 8960$ кг/м³);

$A = b \cdot h$ – площа поперечного перерізу шини, м²;

b, h – відповідно ширина та висота шини, м;

$u(x, t)$ – прогин шини у вертикальному напрямку в точці з координатою x у момент часу t ;

E – модуль Юнга, Па (для міді $E_{Cu} \approx 1,1 \cdot 10^{11}$ Па);

$J = \frac{bh^3}{12}$ – момент інерції прямокутного поперечного перерізу шини, м⁴;

$f(x, t)$ – розподілене зовнішнє навантаження на шину, Н/м, наприклад, імпульсна електродинамічна сила при короткому замиканні.

Виділяються дві стадії руху струмопровідних шин: вимушене – під впливом електродинамічних зусиль та вільне – після відключення короткого замикання. Диференціальне рівняння руху пружної балки моделює прогин шини під дією сили $f(x, t)$. Воно дозволяє моделювати як примусові ($f(x, t) \neq 0$), так і вільні коливання ($f(x, t) = 0$) після дії імпульсу.

Умова міцності для ізолятора (кріплення шини):

$$\frac{F(t)}{2} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (5)$$

$F(t)$ – сила, що діє на шину від короткого замикання, Н;

2 – число для двох ізоляторів (по обидва боки прольоту);

$\sigma_{\text{доп}}$ – допустиме напруження для матеріалу ізолятора, Па.

Умова (5) призначена для перевірки, чи витримує ізолятор навантаження, яке передає шина. Вона розглядається як статичне навантаження, що діє через дві опори. Якщо нерівність виконується, то конструкція вважається електромеханічно стійкою.

Для автоматизації розрахунку електродинамічної стійкості шин при короткому замиканні розроблено програму на Python – одній із провідних мов програмування за рейтингом ТЮВЕ [9]. Алгоритм програми для оцінки електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин суднового ГРЩ наступний:

1. Вибір поперечного перерізу шини:

– прямокутний (1) – окремо враховується монтажне положення;

– квадратний (2) – монтажне положення не має значення через симетрію.

2. Введення геометричних параметрів.

Для прямокутного перерізу:

– горизонтальне площинне (1): шина лежить плазом – ширина шини b (мм $\rightarrow$ м); висота шини h (мм $\rightarrow$ м);

– вертикальне реброве (2): шина встановлена на ребро – висота шини h (мм $\rightarrow$ м); товщина шини b (мм $\rightarrow$ м).

Для квадратного перерізу: $b = h = H$ – сторона квадрата (мм $\rightarrow$ м).

3. Введення додаткових параметрів: довжина прольоту l (м); відстань d між центрами шин (м) з перевіркою $d > b$, інакше помилка та повернення до п. 1; ударний струм короткого замикання $i_{\text{уд}}$ (кА $\rightarrow$ А); конструктивні коефіцієнти форми K_{ϕ} та розташування $K_{\text{розт}}$; коефіцієнт динамічного навантаження η .

4. Обчислення геометричних характеристик поперечного перерізу шини.

Момент інерції J (м⁴) і момент опору W (м³):

– для прямокутного перерізу при горизонтальному площинному монтажі:

$$J_x = \frac{bh^3}{12}; \quad W_x = \frac{I}{h/2} = \frac{bh^2}{6};$$

– для прямокутного перерізу при вертикальному ребровому монтажі:

$$J_y = \frac{hb^3}{12}; \quad W_y = \frac{I}{b/2} = \frac{hb^2}{6};$$

– для квадратного перерізу:

$$J_{xy} = \frac{H^4}{12}; \quad W_{xy} = \frac{H^3}{6}.$$

5. Розрахунок площі поперечного перерізу $A = b \cdot h$ (мм²).

6. Розрахунок маси шини при густині міді $\rho_{\text{Cu}} = 8960$ кг/м³:

$$m = \rho_{\text{Cu}} \cdot V = \rho_{\text{Cu}} \cdot A \cdot l = \rho_{\text{Cu}} \cdot b \cdot h \cdot l \text{ (кг)}.$$

7. Розрахунок першої частоти власних коливань:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A l}} = \frac{r_1^2}{2\pi l} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}},$$

де $r_1 = 4,73$ – розрахунковий коефіцієнт шинних конструкцій.

8. Розрахунок максимальної динамічної сили $F_{\text{max}}^{(3)}$ на ізолятор:

$$F_{\text{max}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} l (i_{\text{уд}}^{(3)})^2 K_{\phi} K_{\text{розт}},$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт форми, що визначається за результатами аналізу довідкових діаграм функціональної залежності $K_{\phi} = f\left(\frac{a-b}{b+h}; \frac{b}{h}\right)$;

$K_{\text{розт}}$ – коефіцієнт взаємного розташування шин, який при розташуванні шин в одній площині $K_{\text{розт}} = 1$.

9. Розрахунок максимального динамічного напруження в матеріалі шин:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}^{(3)} l}{\lambda W} \eta,$$

де λ – коефіцієнт розрахунку міцності шинних конструкцій (для багатопрольотних конструкцій: $\lambda = 10$ – для крайніх прольотів; $\lambda = 12$ – для середніх прольотів);

$\eta = 1,0 - 2,0$ – динамічний коефіцієнт, що враховує додаткові динамічні сили при короткому замиканні.

10. Виведення результатів: момент інерції J (м⁴); момент опору W (м³); площа A (м²); маса m (кг); перша частота власних коливань f_1 (Гц); максимальна сила на ізолятор F_{max} (кН); максимальне напруження в матеріалі шин σ_{max} (МПа).

11. Запит про повторення розрахунку: якщо «так» (1), то повернення до п. 1, якщо «ні» (2) то завершення програми.

Фрагмент програмного коду (рис. 2) і блок-схему (рис. 3) розрахункової програми,

```

# Визначення розмірів шини
if section == "Прямокутний":
    if mount == "Плалшмя":
        b, h = B/1000, H/1000
    elif mount == "На ребро":
        h, b = B/1000, H/1000
elif section == "Квадратний":
    b = h = H/1000
# Геометричні характеристики
A = b*h
J = (b*h**3)/12
W = (b*h**2)/6
# Фізичні параметри
rho = 8960
m = rho*A*l
E = 1.1e11
r1 = 4.73
f1 = (r1**2/(2*pi*l**2))*sqrt(E*J/m)
# Максимальне навантаження та напруження
Fmax = (sqrt(3)*1e-7/d)*l*iуд**2*Kф*Kрозт/1000
lam = 12
sigma_max = (Fmax*1000*l)/(lam*W)*eta/1e6

```

Рис. 2. Фрагмент коду розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і шин

реалізованої в Python, створено на основі наведеного вище алгоритму.

Суднова електроенергетична система є ізольованою автономною мережею з обмеженим джерелом живлення (переважно дизель-генератором), що зумовлює меншу величину струму короткого замикання порівняно з береговими промисловими установками. Це вимагає миттєвої роботи захисту, щоб уникнути порушення функціонування судна. Типовий час спрацювання захисту при трифазному короткому замиканні становить 0,05–0,2 с без витримки часу і 0,1–0,5 с із короткою витримкою. Для розрахунку нагріву шин [10, 11] у судовому ГРЩ зазвичай приймають інтервал 0,1–0,2 с, що дозволяє врахувати тепловий імпульс до вимкнення аварії. Температура нагріву Θ струмопровідної шини з початковою температурою $\Theta_0 = 20^\circ\text{C}$ через підвищення температури $\Delta\Theta$ внаслідок дії струму короткого

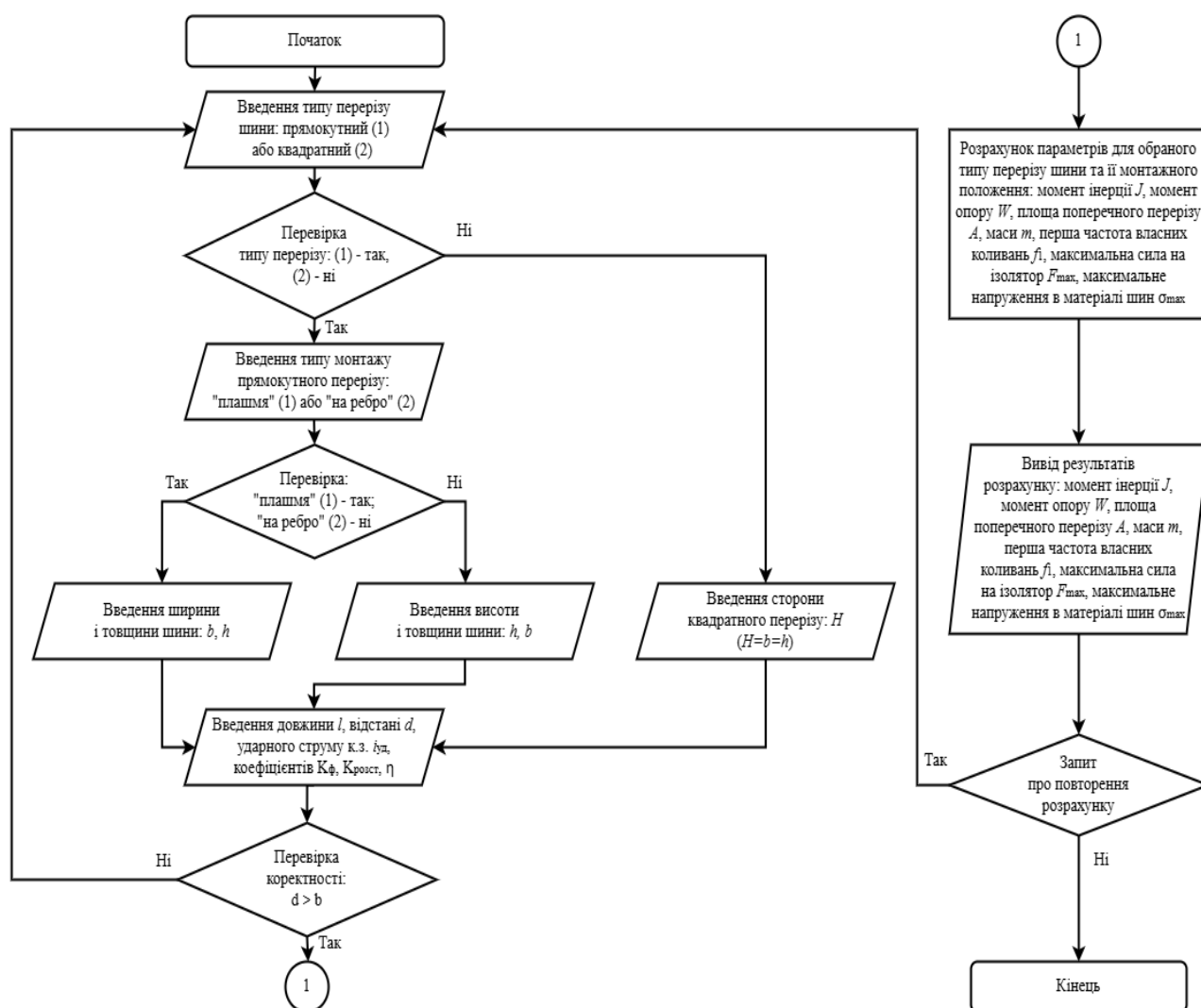


Рис. 3. Блок-схема алгоритму програми

замикання для мідної шини прямокутного перерізу 100×10 мм при площі поперечного перерізу $A = b \cdot h = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ мм}^2$ та питомій теплоємності $\gamma_{Cu} = 0,132 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / (\text{мм}^4 \cdot ^\circ\text{С})$ при струмі $i_{уд}^{(3)} = 10 \text{ кА}$ за час дії $t = 0,2 \text{ с}$ обчислюється за виразом:

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta = \frac{(i_{уд}^{(3)})^2 t}{A^2 \gamma_{Cu}} = 20 + \frac{10000^2 \cdot 0,2}{1000^2 \cdot 0,132} \approx 171,5 ^\circ\text{С}.$$

Отримане значення температурного підвищення $\Delta\Theta$ при струмі $i_{уд}^{(3)} = 10 \text{ кА}$ є прийнятним для короткочасного режиму, оскільки максимально допустима тимчасова температура при короткому замиканні для міді $\Theta_{Cu, т.д.} = 250\text{--}300 ^\circ\text{С}$.

Прогнозовану деформацію поліамідних ізоляторів SM76 з латунними вставками та мідних струмопровідних шин 100×10 мм у ребровому (а) та площинному (б) положенні під дією електродинамічних сил, що виникають при трифазному короткому замиканні зображено на рис. 4. Темним зонам відповідають найбільшим значенням деформацій, сірим та світлим – відповідно середні та найменші значення.

На рис. 5 проілюстровано чотири варіанти розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин 100×10 мм судного ГРЩ з довжиною прольоту $l = 1 \text{ м}$ при значно більшому ударному струмі $i_{уд}^{(3)} = 40 \text{ кА}$: прямокутний переріз з горизонтальним площинним положенням при $d=0,2 \text{ м}$ (рис. 5, а);

прямокутний переріз з вертикальним ребровим положенням при $d = 0,1 \text{ м}$ (рис. 5, б); квадратний переріз зі стороною $H = 30 \text{ мм}$ при міжфазних відстанях $d = 0,1$ і $d = 0,2 \text{ м}$ (рис. 5, в-г).

Для чотирьох наведених розрахунків умови електродинамічної міцності виконуються. Для композитних ізоляторів SM76 максимальна сила F_{max} на ізолятор не перевищує механічної руйнівної сили на вигин – 30 кН [12], а для мідних шин, виготовлених з електротехнічної міді, максимальне напруження σ_{max} не перевищує допустимих в стандарті [13] значень: межа плинності для м'якої міді (R220) – не менше 70 МПа , для твердої міді (R290) – не менше 190 МПа .

Висновки. У статті проведено аналіз електродинамічної стійкості композитних ізоляторів SM76 (поліамід) і мідних струмопровідних шин (прямокутного 100×10 мм і квадратного 30×30 мм поперечного перерізу) для суднового ГРЩ в режимі трифазного короткого замикання. Наведено математичні залежності, що дозволяють оцінювати максимальні сили, що діють на ізолятори, і максимальні напруження в матеріалі шин. Розроблено алгоритм і блок-схему розрахункового моделювання, а також виконано програмну реалізацію в середовищі Python. Для підтвердження ефективності запропонованого підходу при ударному струмі $i_{уд}^{(3)} = 40 \text{ кА}$ виконано чотири приклади розрахунків для різних варіантів конструкцій та монтажного положення шин.

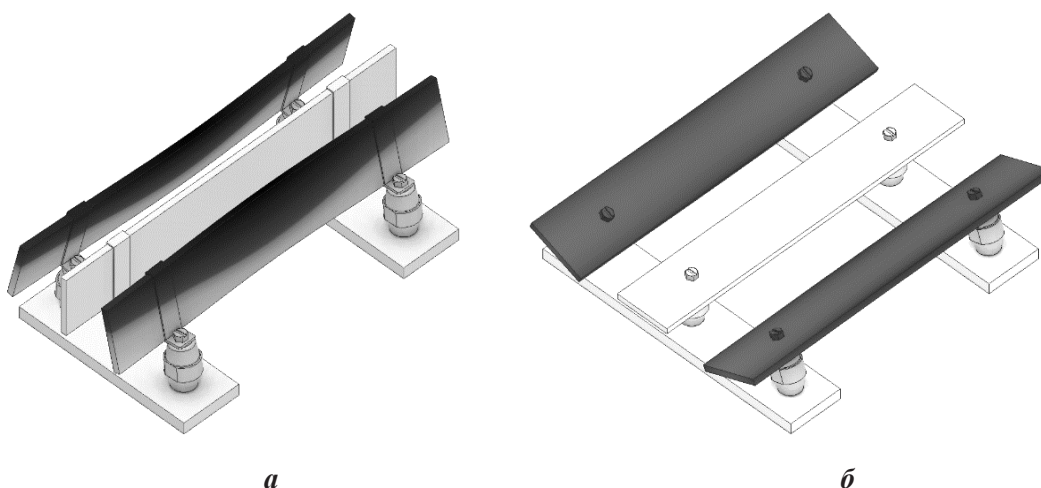


Рис. 4. Прогнозована деформація ізоляторів SM76 з композиційною конструкцією (поліамідний корпус із латунними різьбовими вставками) та мідних струмопровідних шин з прямокутним перерізом 100×10 мм у ребровому (а) та площинному (б) положенні під дією електродинамічних сил в режимі короткого замикання

а

Тип перерізу шини: Прямокутний

Тип монтажу: Пляшмя

Ширина b (мм): 100

Товщина h (мм): 10

Довжина прольоту l (м): 1

Відстань між центрами шин d (м): 0.2

Ударний струм короткого замикання $i_{уд}$ (кА): 40

Коефіцієнт форми шини K_f : 1

Коефіцієнт взаємного розташування Крозт.: 1

Коефіцієнт динамічного навантаження η : 1

Розрахувати

Момент інерції J : $8.33 \times 10^{-9} \text{ м}^4$
 Момент опору W : $1.67 \times 10^{-5} \text{ м}^3$
 Площа перерізу A : 1000.00 мм^2
 Маса шини m : 8.96 кг
 Перша частота власних коливань f_1 : 36.02 Гц
 Максимальна сила на ізолятор F_{max} : 1.39 кН
 Максимальне напруження σ_{max} : 69.28 МПа

б

Тип перерізу шини: Прямокутний

Тип монтажу: На ребро

Висота h (мм): 100

Товщина b (мм): 10

Довжина прольоту l (м): 1

Відстань між центрами шин d (м): 0.1

Ударний струм короткого замикання $i_{уд}$ (кА): 40

Коефіцієнт форми шини K_f : 1

Коефіцієнт взаємного розташування Крозт.: 1

Коефіцієнт динамічного навантаження η : 1

Розрахувати

Момент інерції J : $8.33 \times 10^{-7} \text{ м}^4$
 Момент опору W : $1.67 \times 10^{-5} \text{ м}^3$
 Площа перерізу A : 1000.00 мм^2
 Маса шини m : 8.96 кг
 Перша частота власних коливань f_1 : 360.16 Гц
 Максимальна сила на ізолятор F_{max} : 2.77 кН
 Максимальне напруження σ_{max} : 13.86 МПа

в

Тип перерізу шини: Квадратний

Розмір сторони H (мм): 30

Довжина прольоту l (м): 1

Відстань між центрами шин d (м): 0.1

Ударний струм короткого замикання $i_{уд}$ (кА): 40

Коефіцієнт форми шини K_f : 1

Коефіцієнт взаємного розташування Крозт.: 1

Коефіцієнт динамічного навантаження η : 1

Розрахувати

Момент інерції J : $6.75 \times 10^{-8} \text{ м}^4$
 Момент опору W : $4.50 \times 10^{-6} \text{ м}^3$
 Площа перерізу A : 900.00 мм^2
 Маса шини m : 8.06 кг
 Перша частота власних коливань f_1 : 108.05 Гц
 Максимальна сила на ізолятор F_{max} : 2.77 кН
 Максимальне напруження σ_{max} : 51.32 МПа

г

Тип перерізу шини: Квадратний

Розмір сторони H (мм): 30

Довжина прольоту l (м): 1

Відстань між центрами шин d (м): 0.2

Ударний струм короткого замикання $i_{уд}$ (кА): 40

Коефіцієнт форми шини K_f : 1

Коефіцієнт взаємного розташування Крозт.: 1

Коефіцієнт динамічного навантаження η : 1

Розрахувати

Момент інерції J : $6.75 \times 10^{-8} \text{ м}^4$
 Момент опору W : $4.50 \times 10^{-6} \text{ м}^3$
 Площа перерізу A : 900.00 мм^2
 Маса шини m : 8.06 кг
 Перша частота власних коливань f_1 : 108.05 Гц
 Максимальна сила на ізолятор F_{max} : 1.39 кН
 Максимальне напруження σ_{max} : 25.66 МПа

Рис. 5. Вихідні дані та результати розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин при короткому замиканні у судновому ГРЩ:
 а – шина з прямокутним перерізом при монтажі «пляшмя»;
 б – шина з прямокутним перерізом при монтажі «на ребро»; в-г – квадратний переріз

Список літератури:

1. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папайка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. для ВНЗ / за ред. Г. Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. 5-те вид., доопрац. та допов. Дніпро: НГУ, 2016. 600 с. URL: <https://surli.li/lrxuas> (дата звернення: 05.05.2025).
2. Козирський В. В., Гай О. В. Перехідні процеси в енергетиці: навч. посіб. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 489 с.
3. Черемісін М. М. Перехідні процеси в системах електропостачання: навч. посіб. Харків: Факт, 2005. 176 с.
4. Шкрабець Ф. П., Плешков П. Г. Основи електропостачання: навч. посіб. Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010. 408 с. URL: <https://surli.cc/zlyjit> (дата звернення: 05.05.2025).
5. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. Т. 4 / редкол.: Севрюков В. В. [та ін.]. 3-тє вид., із змін. та допов. Київ: Логос, 2011. 656 с.

6. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): електротехн. нормат. вид. Офіц. вид. Київ: Мінпаливенерго України, 2017. 584 с. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (дата звернення: 05.05.2025).

7. ДСТУ EN 61534-1:2019. Системи шинопроводів. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61534-1:2011 + A1:2014, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 57 с.

8. ДСТУ ІЕС 60909-4:2008. Струм короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання (ІЕС TR 60909-4:2000, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2008. 57 с.

9. TIOBE Software. TIOBE Index for April 2025 / TIOBE Software BV. Режим доступу: <https://www.tiobe.com/tiobe-index> (дата звернення: 05.05.2025).

10. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубева С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Київ: ДУІТ, 2021. Випуск 3 (34). С. 13–21.

11. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК: науково-технічний журнал. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60–63.

12. Ізолятори SM / Slavgorenergo. URL: <https://slavgorenergo.com.ua/ua/g108757398-izolyatory> (дата звернення: 05.05.2025).

13. ДСТУ EN 13601:2010 Мідь та мідні сплави. Прутки, шина та дріт мідні загальної електричної призначеності. Технічні умови (EN 13601:2002, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2011. 22 с.

Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Cherednyk V.M., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Pastukh O.V.
ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC STABILITY OF INSULATORS AND BUSBARS
OF THE MAIN SWITCHBOARD OF A SHIP UNDER SHORT-CIRCUIT CONDITIONS

This paper evaluates the electrodynamic stability of SM 76 composite insulators and copper conductor busbars of rectangular and square cross-section in the ship's main switchboard (MSB), taking into account their installation position under three-phase short-circuit conditions. The analysis was carried out for a three-phase MSB design with one busbar per phase, which is a typical solution for medium-power shipboard electrical power systems. The busbars of the three phases are arranged in a single horizontal row to simplify installation and reduce space requirements in shipboard environments. This study considers shipboard power grids with copper busbars, which, unlike shore-based systems, require higher conductivity and greater corrosion resistance. The basic mathematical equations that can be used to describe the electrical and mechanical behavior of conductive busbars under three-phase short-circuit conditions are presented.

In the event of a three-phase short circuit, if the busbars of phases A, B, and C are arranged in a single row, electrodynamic forces are generated, with their directions determined by the busbar layout and instantaneous current directions. Due to the 120° phase shift, the busbars may attract or repel each other at different moments. Attraction occurs when currents flow in the same direction (electrodynamic convergence), while repulsion occurs when currents flow in opposite directions. In the first few milliseconds after the short circuit, the shock current (i_{peak}) reaches its maximum amplitude, generating the highest electrodynamic forces. It is at this moment that the electrodynamic forces can reach critical levels, potentially damaging the busbars or their fasteners.

The calculation of the electrodynamic stability of the busbars involved determining the moment of inertia, section modulus, natural oscillation frequency, maximum stress in the busbars, and maximum load on the insulators. To perform the calculation, an algorithm was developed, a corresponding flowchart was built, and a program was created using one of the most common technical programming tools – Python. Four case studies of the calculation algorithm application are considered for copper busbars of rectangular (100×10 mm) and square (30×30 mm) cross-sections, with a span length between insulators of 1 m and a shock current of 40 kA, considering different distances between busbar centers and different installation orientations for rectangular busbars.

Key words: *electrodynamic stability, insulators, busbars, three-phase short circuit, shipboard main switchboard.*