

УДК 621.316.925

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.113-122](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.113-122)

**Н.Ю. Гарасьова**, доц., канд. техн. наук, **А.І. Котиш**, доц., канд. техн. наук, **В.П. Солдатенко**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Зінзура**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: vasilyzinzura@gmail.com*

## Моделювання перехідних процесів в синхронному генераторі при витковому замиканні обмотки статора

Робота присвячена розробці математичної моделі синхронного генератора для дослідження режимів його роботи при несиметричному пошкодженні фаз обмотки статора, а саме витковому замиканні, застосування якої дасть змогу удосконалити системи релейного захисту від виткових замикань обмотки статора синхронного генератора. Показано, що для вирішення поставленої задачі дослідження доцільно використати диференціальні рівняння, що записані для осей фаз статора  $a$ ,  $b$  та  $c$ . Запропоновано алгоритм розрахунку перехідних процесів в синхронному генераторі при виткових замиканнях обмотки статора, в основу якого покладено метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку. Отримані результати моделювання можуть бути використані при налаштуванні систем релейного захисту синхронних генераторів, а саме захистів від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

**синхронний генератор, виткове замикання, математична модель**

**Постановка проблеми.** Основним джерелом генерації електричної енергії в Україні є теплові та гідроелектростанції з встановленими на них синхронними генераторами. Для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів і для зменшення кількості випадків пошкоджень синхронних генераторів необхідно забезпечити їх надійну роботу. Одним із найпоширеніших та найважчих пошкоджень генераторів, яке призводить до їх відключення від електричної мережі, є виткове замикання обмотки статора. Згідно Правил улаштування електроустановок, для захисту синхронних генераторів від виткових замикань застосовується поперечний диференційний захист. Проте такий захист можливо застосовувати лише на генераторах з паралельними вітками у фазі обмотки статора. Тому задача дослідження виткового замикання обмотки статора синхронного генератора без паралельних віток в фазі обмотки статора є досить актуальною, а її вирішення дасть змогу вдосконалити роботу пристроїв релейного захисту та підвищити надійність роботи синхронних генераторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час розроблено досить велику кількість методів, що дозволяють виявити виткові замикання в обмотках статора синхронних генераторів.

В роботах [1 – 6] пропонується в якості інформативного параметру наявності виткового замикання в обмотці статора використовувати параметри поля розсіювання.

Так, в роботі [1] запропоновано метод виявлення виткових замикань в обмотці статора синхронного генератора шляхом аналізу параметрів магнітного потоку поля розсіювання. Цей метод вимагає встановлення датчика магнітного потоку на осердя статора а також інструментів для здійснення інтерпретації сигналів з датчика.

В роботі [2] запропоновано метод виявлення виткових замикань синхронних генераторів, що заснований на використанні інформації, яка надходить від зовнішніх датчиків магнітного потоку, що розташовані під кутом  $180^\circ$  один відносно іншого. Аналогічний підхід до виявлення виткових замикань описано в роботі [3], в якій автори пропонують використовувати більшу кількість датчиків магнітного потоку для підвищення чутливості системи до виявлення пошкоджень обмотки статора.

В роботі [4] запропоновано метод аналізу інформації від датчиків магнітного потоку, який не вимагає даних про нормальний стан синхронного генератора. Даний метод заснований на використанні магнітної несиметрії, що створюється полюсами ротора у випадках пошкоджень.

В роботі [5] запропоновано метод виявлення виткових замикань в обмотці синхронного генератора, заснований на спектральному аналізі даних від датчиків магнітного потоку.

В статті [6] представлена методика виявлення виткового замикання, яка базується на статистичній обробці інформації, що надходить від зовнішніх датчиків магнітного потоку. Даний метод передбачає розрахунок коефіцієнту кореляції Пірсона між двома сигналами, що надходять від двох датчиків магнітного потоку при різних режимах навантаження. Це дозволяє з високим ступенем ймовірності виявляти пошкодження обмоток синхронних генераторів на ранніх стадіях їх появи.

Загальним недоліком методів виявлення виткових замикань, що описані в роботах [1 – 6] є необхідність використання зовнішніх датчиків магнітного потоку, що суттєво ускладнює конструкцію синхронних генераторів.

В роботі [7] пропонується метод виявлення виткових замикань, який передбачає встановлення вимірювальних котушок і датчика Холла на зубці статора генератора та навколо нього. Аналогічний підхід описано в роботі [8]: датчики магнітного поля встановлюються в пазах статора в різних місцях з метою вимірювання наведених напруг, з проведенням подальшого аналізу їх параметрів. Недоліком методів виявлення виткових замикань, описаних в роботах [7, 8] є значне ускладнення конструкції статора синхронного генератора за рахунок необхідності встановлення датчиків в його пазах.

В роботі [9] пропонується метод виявлення виткових замикань, який передбачає проведення спектрального аналізу струмів статора. Автори встановили, що із збільшенням кількості замкнутих між собою витків обмотки статора збільшуються амплітуди певних гармонічних складових струму статора, що, в свою чергу, може слугувати надійним інформативним параметром про наявність виткового замикання. Проте, в роботі [9] дослідження проводились для синхронного генератора вітряної електростанції, який за своєю конструкцією суттєво відрізняється від генераторів теплових та гідроелектростанцій.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розробка математичної моделі синхронного генератора для дослідження режимів його роботи при несиметричному пошкодженні фаз обмотки статора, а саме витковому замиканні, застосування якої дасть змогу удосконалити системи релейного захисту від виткових замикань обмотки статора синхронного генератора.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при витковому замиканні обмотки статора найбільш доцільно скористатись методом математичного моделювання. Найбільш широкого застосування набув підхід до моделювання синхронного генератора з використанням рівнянь Парка-Горєва [10], що записані для поздовжньої ( $d$ ) та поперечної ( $q$ ) осей синхронної машини, зв'язаних з ротором. Але, застосування цих рівнянь обмежене випадком, коли при перехідних процесах не порушується симетрія фаз генератора. Тому для вирішення

поставленої задачі дослідження доцільно використати диференційні рівняння, що записані для осей фаз  $a$ ,  $b$  та  $c$  статора [10]:

$$\mathbf{U}_{ms} = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{ms} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{r}_{ms} \cdot \mathbf{i}_{ms} \quad (1)$$

де  $\mathbf{U}_{ms}$  – матриця напруг синхронного генератора:

$$\mathbf{U}_{ms} = \begin{bmatrix} -U_{ан} & -U_{ап} & -U_b & -U_c & -U_f & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

$\boldsymbol{\Psi}_{ms}$  – матриця потокозчеплень синхронного генератора:

$$\boldsymbol{\Psi}_{ms} = \begin{bmatrix} \Psi_{ан} & \Psi_{ап} & \Psi_b & \Psi_c & \Psi_f & \Psi_{yd} & \Psi_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

$\mathbf{r}_{ms}$  – матриця опорів синхронного генератора:

$$\mathbf{r}_{ms} = \begin{bmatrix} r_{ан} & r_{ап} & r_b & r_c & r_f & r_{yd} & r_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

$\mathbf{i}_{ms}$  – матриця струмів синхронного генератора:

$$\mathbf{i}_{ms} = \begin{bmatrix} i_{ан} & i_{ап} & i_b & i_c & i_f & i_{yd} & i_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

$\mathbf{E}$  – одинична матриця 7-го порядку;

$U_a, U_b, U_c$  – напруги на затискачах обмоток статора;

$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, i_a, i_b, i_c$  – повні потокозчеплення та струми обмоток фаз статора відповідно;

$r_a, r_b, r_c$  – активні опори обмоток фаз статора;

$U_f$  – напруга на затискачах обмотки збудження;

$\Psi_f, i_f$  – потокозчеплення і струм обмотки збудження;

$r_f$  – активний опір обмотки збудження;

$r_{yd}, r_{yq}$  – активні опори еквівалентних демпферних обмоток;

$\Psi_{yd}, \Psi_{yq}, i_{yd}, i_{yq}$  – потокозчеплення та струми еквівалентних демпферних обмоток по поздовжній та поперечній осям відповідно.

Індекси «н» та «п» відповідають непошкодженій та пошкодженій частині обмотки, при цьому  $U_{ан} = U_a, U_{ап} = 0$ .

Потокозчеплення обмоток фаз статора з обмоткою збудження і демпферними контурами можуть бути записані у вигляді:

$$\boldsymbol{\Psi}_{ms} = \mathbf{L}_{ms} \mathbf{i}_{ms}, \quad (6)$$

де  $\mathbf{L}_{ms}$  – матриця індуктивностей синхронного генератора:

$$\mathbf{L}_{ms} = \begin{bmatrix} l_{ан} & l_{анп} & l_{анb} & l_{анc} & l_{anf} & l_{анyd} & l_{анyq} \\ l_{апан} & l_{ап} & l_{апb} & l_{апc} & l_{апf} & l_{апyd} & l_{апyq} \\ l_{бан} & l_{бап} & l_b & l_{bc} & l_{bf} & l_{byd} & l_{byq} \\ l_{сан} & l_{сап} & l_{cb} & l_c & l_{cf} & l_{cyd} & l_{cyq} \\ l_{фан} & l_{фап} & l_{fb} & l_{fc} & l_f & l_{fyd} & 0 \\ l_{yдан} & l_{yдап} & l_{ydb} & l_{ydc} & l_{ydf} & l_{yd} & 0 \\ l_{yqан} & l_{yqап} & l_{yqb} & l_{yqc} & 0 & 0 & l_{yq} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $l_{ан}, l_{ап}, l_b, l_c$  – власні індуктивності обмоток фаз статора;

$l_f, l_{yd}, l_{yq}$  – власні індуктивності ротора і демпферних обмоток;  
 $l_{анав}, l_{анb}, l_{анc}, l_{анb}, l_{анc}, l_{bc}$  – взаємні індуктивності обмоток фаз статора;  
 $l_{anf}, l_{anf}, l_{bf}, l_{cf}$  – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з обмоткою збудження;

$l_{ануд}, l_{ануд}, l_{буд}, l_{буд}$  – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з демпферною обмоткою по продольній осі;

$l_{ануq}, l_{ануq}, l_{буq}, l_{буq}$  – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з демпферною обмоткою по поперечній осі.

Слід відмітити, що матриця  $\mathbf{L}_{ms}$  симетрична відносно головної діагоналі, тобто  $l_{ij} = l_{ji}$ .

Коефіцієнти взаємоіндукції (а для генераторів з явновираженими полюсами і коефіцієнти самоіндукції) являються тригонометричними функціями кута повороту ротора і можуть бути представлені при врахуванні тільки двох перших членів розкладання в ряд Фур'є. Враховуючи це вирази для знаходження елементів матриці індуктивностей  $\mathbf{L}_{ms}$  можливо записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 l_{ан} &= k_1 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); & l_{ан} &= k_2 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); \\
 l_b &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma - 2\pi/3); & l_c &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{анав} &= k_3 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); & l_{анb} &= k_4 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3)); \\
 l_{анc} &= k_5 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3)); & l_{анb} &= k_6 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3)); \\
 l_{анc} &= k_7 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3)); & l_{bc} &= -m_0 + l_2 \cos 2\gamma; \\
 l_{anf} &= k_8 (l_{afd} \cos \gamma); & l_{anf} &= k_9 (l_{afd} \cos \gamma); \\
 l_{bf} &= l_{afd} \cos(\gamma - 2\pi/3); & l_{cf} &= l_{afd} \cos(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{ануд} &= k_{10} (l_{ayd} \cos \gamma); & l_{ануд} &= k_{11} (l_{ayd} \cos \gamma); \\
 l_{буд} &= l_{ayd} \cos(\gamma - 2\pi/3); & l_{буд} &= l_{ayd} \cos(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{ануq} &= -k_{12} (l_{ayq} \sin \gamma); & l_{ануq} &= -k_{13} (l_{ayq} \sin \gamma); \\
 l_{буq} &= -l_{ayq} \sin(\gamma - 2\pi/3); & l_{буq} &= -l_{ayq} \sin(\gamma + 2\pi/3);
 \end{aligned} \tag{8}$$

де  $\gamma$  – кут між віссю фази та поздовжньою віссю ротора;

$l_{afd}$  – взаємна індуктивність фази  $a$  статора і обмотки збудження при співпадінні їх магнітних осей;

$l_{ayd}, l_{ayq}$  – взаємні індуктивності фази  $a$  обмотки статора і демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осям, відповідно, при співпадінні їх магнітних осей;

$l_0, l_2$  – індуктивності, що визначаються за виразами:

$$l_0 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} = \frac{L_d + L_q}{2}; \quad l_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} = \frac{L_d - L_q}{2}. \tag{9}$$

Коефіцієнти  $k_1 - k_{13}$  залежать від кількості замкнутих витків фази  $a$ .

Система (1) містить потокозчеплення, що стоять під знаком диференціалу. Отримати похідні потокозчеплень у часі можна з системи алгебраїчних рівнянь (6):

$$\frac{d}{dt} \Psi_{ms} = \frac{d\mathbf{L}_{ms}}{dt} \mathbf{i}_{ms} + \frac{d\mathbf{i}_{ms}}{dt} \mathbf{L}_{ms} \tag{10}$$

Похідні індуктивностей, що входять до системи рівнянь (10), можуть бути отримані з системи рівнянь (8). Враховуючи, що  $d\gamma/dt = \omega$  вирази для знаходження елементів матриці  $d\mathbf{L}_{ms}/dt$  можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 \frac{dl_{an}}{dt} &= -2\omega k_1 l_2 \sin(2\gamma); & \frac{dl_{an}}{dt} &= -2\omega k_2 l_2 \sin(2\gamma); \\
 \frac{dl_b}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_c}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anap}}{dt} &= -2\omega k_3 l_2 \sin(2\gamma); & \frac{dl_{anb}}{dt} &= -2\omega k_4 l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anc}}{dt} &= -2\omega k_5 l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); & \frac{dl_{anb}}{dt} &= -2\omega k_6 l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anc}}{dt} &= -2\omega k_7 l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); & \frac{dl_{bc}}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma); \\
 \frac{dl_{anf}}{dt} &= -\omega k_8 l_{afd} \sin \gamma; & \frac{dl_{anf}}{dt} &= -\omega k_9 l_{afd} \sin \gamma; \\
 \frac{dl_{bf}}{dt} &= -\omega l_{afd} \sin(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cf}}{dt} &= -\omega l_{afd} \sin(\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anyd}}{dt} &= -\omega k_{10} l_{ayd} \sin \gamma; & \frac{dl_{anyd}}{dt} &= -\omega k_{11} l_{ayd} \sin \gamma; \\
 \frac{dl_{byd}}{dt} &= -\omega l_{ayd} \sin(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cyd}}{dt} &= -\omega l_{ayd} \sin(\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anyq}}{dt} &= -\omega k_{12} l_{ayq} \cos \gamma; & \frac{dl_{anyq}}{dt} &= -\omega k_{13} l_{ayq} \cos \gamma; \\
 \frac{dl_{byq}}{dt} &= -\omega l_{ayq} \cos(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cyq}}{dt} &= -\omega l_{ayq} \cos(\gamma + 2\pi/3).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Підставляючи рівняння (11) в систему рівнянь (10) і в систему рівнянь (1) отримаємо систему, яка складається з семи диференціальних рівнянь відносно похідних струмів  $i_{an}, i_{ap}, i_b, i_c, i_f, i_{yd}, i_{yq}$ :

$$\begin{aligned}
 k_{ij} \frac{di_{an}}{dt} + k_{ij} \frac{di_{ap}}{dt} + k_{ij} \frac{di_b}{dt} + k_{ij} \frac{di_c}{dt} + k_{ij} \frac{di_f}{dt} + k_{ij} \frac{di_{yd}}{dt} + k_{ij} \frac{di_{yq}}{dt} = \\
 = F_i(U_i, i_{an}, i_{ap}, i_b, i_c, i_f, i_{yd}, i_{yq})
 \end{aligned} \tag{12}$$

де  $k_{ij}; i=1 \dots 7; j=1 \dots 7$  – коефіцієнти, що залежать від часу;

$F_i; i=1 \dots 7$  – функції, що залежать від напруги контура і струмів.

Така система може бути розв'язана методами чисельного інтегрування. В роботі використовувався метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку. Цей метод потребує представлення диференціальних рівнянь системи (12) у формі Коші, для того, щоб у кожний момент часу можна було визначити величину похідної.

Але, виразити систему, що отримана, у формі Коші достатньо складно. Тому при чисельному інтегруванні для кожного моменту часу розраховуються значення коефіцієнтів  $k_{ij}$ , а потім, використовуючи матричні методи, система (12) розв'язується відносно похідних струмів. Напруга на затискачах генератора розраховується з врахуванням його електричної віддаленості від системи нескінченної потужності.

Блок-схема алгоритму роботи програми представлена на рис. 1.

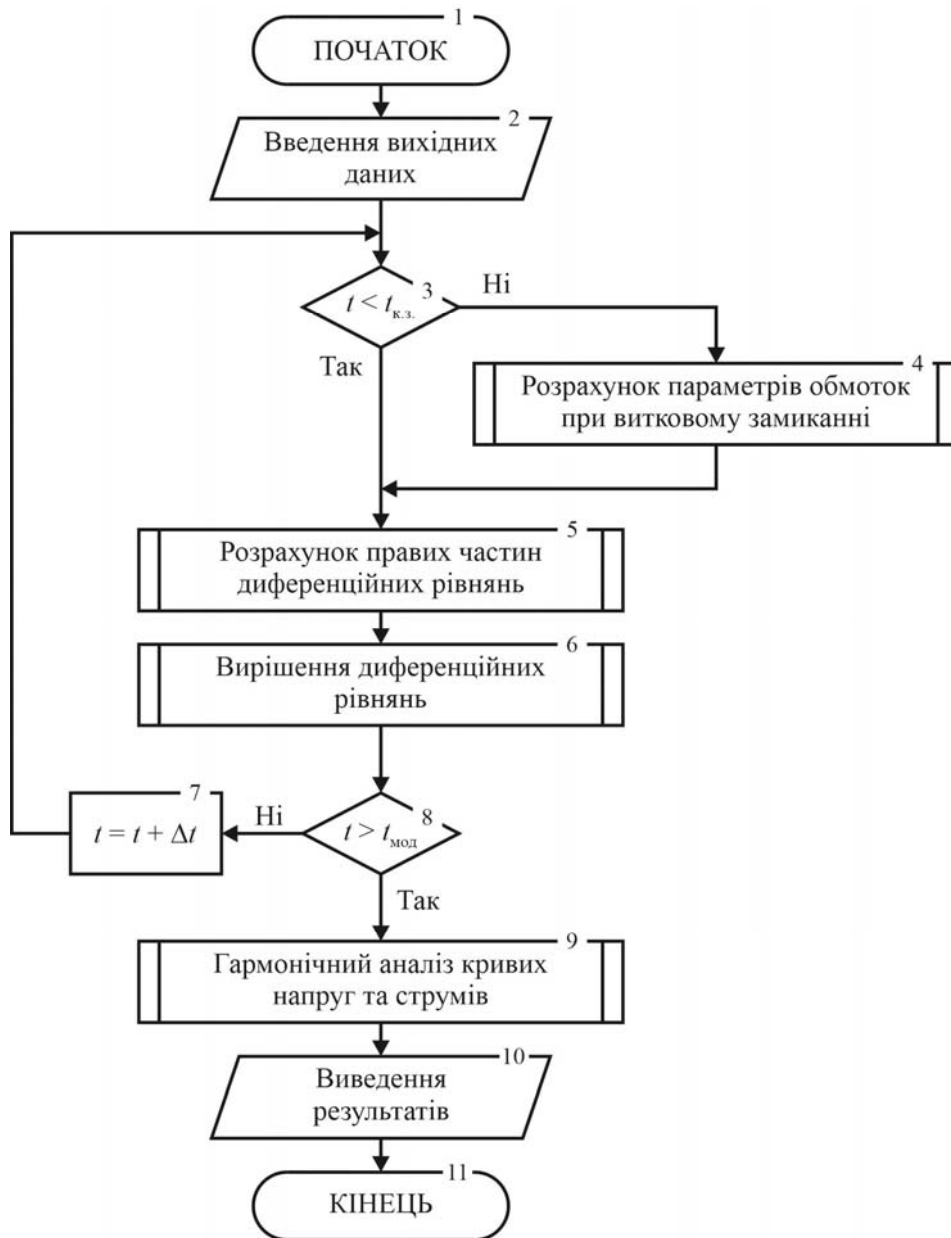


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи програми розрахунків перехідних процесів в синхронному генераторі при виткових замиканнях обмотки статора

Джерело: розроблено авторами

На рис. 1  $t_{к.з.}$  – момент часу виникнення короткого замикання,  $\Delta t$  – крок моделювання,  $t_{мод.}$  – час моделювання.

При виникненні виткових замикань, частина обмотки, що замикається накоротко, не приймає участі у формуванні е.р.с. фази. Таким чином, виткові замикання приводять до зменшення фазної е.р.с. по амплітуді та зміні по фазі.

У контурі, що замкнувся, також буде наводитись е.р.с. пропорційна кількості замкнених витків. Таким чином, у замкнутому контурі буде протікати струм короткого замикання, який і являється основною причиною пошкодження обмотки статора і оплавлення активної сталі.

За допомогою розробленої математичної моделі було проведено розрахунок значень струмів і напруг генератора при виткових замиканнях обмотки статора для турбогенератора ТВВ-200-2. Графіки зміни струмів та напруг статора в усталеному режимі роботи генератора при номінальному навантаженні наведено на рис. 2.

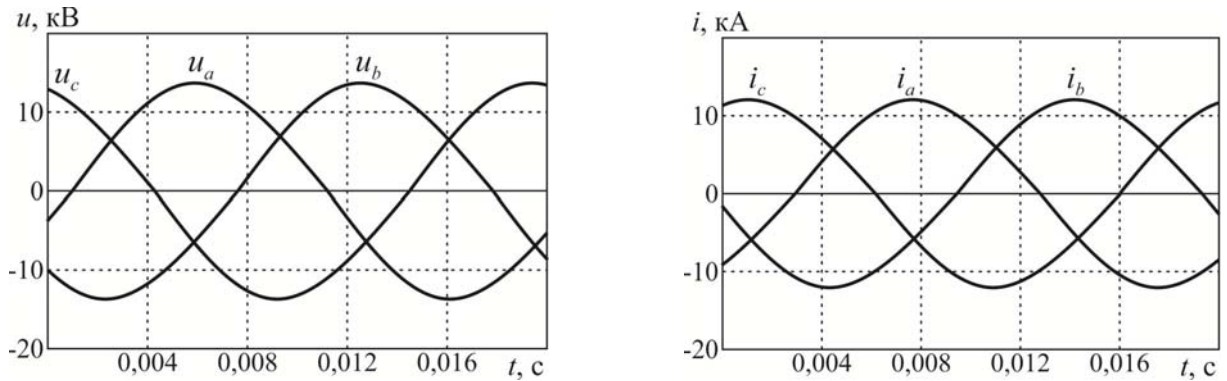


Рисунок 2 – Залежності  $u = f(t)$  та  $i = f(t)$  на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в номінальному режимі

Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 - 5 наведено перший період перехідного процесу при замиканні 10 %, 40 % і 60 % витків фази  $A$  відповідно.

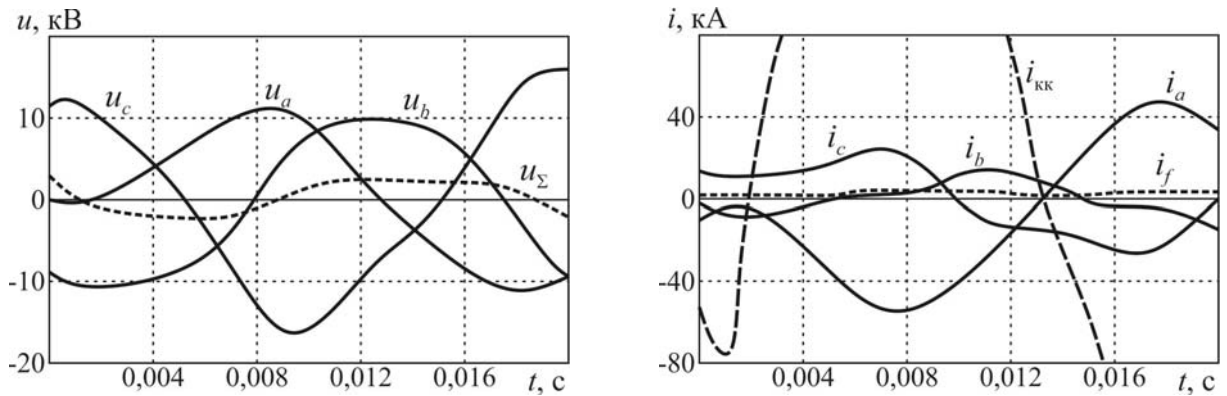


Рисунок 3 – Залежності  $u = f(t)$  та  $i = f(t)$  на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 10 % фази  $a$

Джерело: розроблено авторами

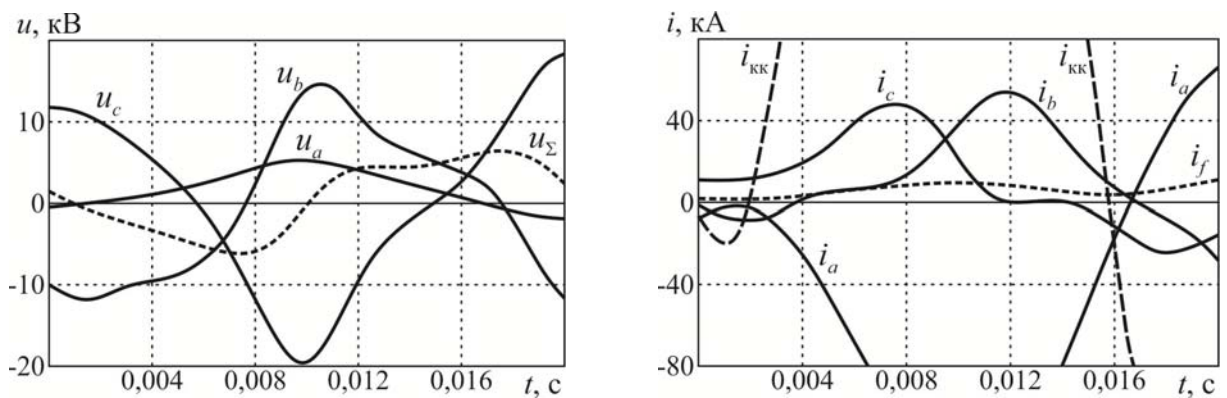


Рисунок 4 – Залежності  $u = f(t)$  та  $i = f(t)$  на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 40 % фази  $a$

Джерело: розроблено авторами

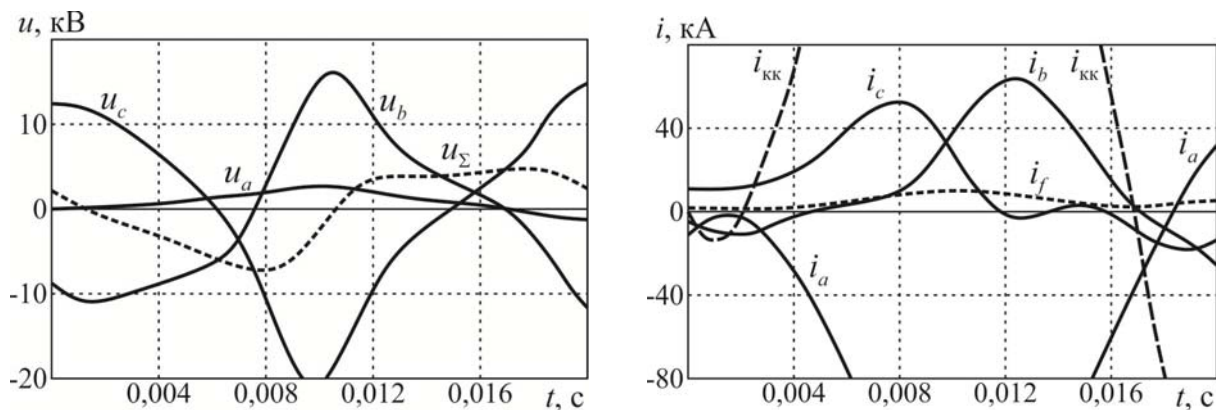


Рисунок 5 – Залежності  $u = f(t)$  та  $i = f(t)$  на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 60 % фази  $a$

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки показують, що амплітуда першої гармоніки напруги пошкодженої фази зменшується наступним чином: при замиканні 10 % фази – на 21 %; при замиканні 40 % фази – на 77 %; при замиканні 60 % фази – на 89 %.

Амплітуда першої гармоніки струму пошкодженої фази збільшується при замиканні 10 % фази – в 3,74 рази, 40 % фази – в 7,13 рази, 60 % фази – в 7,8 рази. Струм в короткозамкненому контурі максимальний при замиканні 10 % фази і сягає значення до 1 МА.

Отримані результати моделювання можуть бути використані при налаштуванні систем релейного захисту синхронних генераторів, а саме захистів від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

**Висновки.** В результаті проведених наукових досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Розроблена математична модель синхронного генератора дозволяє проводити дослідження перехідних процесів при витковому замиканні обмотки статора.

2. Результати математичного моделювання перехідних процесів, що протікають в генераторі ТВВ-200-2 при замиканні різної кількості витків фази статора показали, що зниження напруги основної гармоніки на затискачах генератора у пошкодженій фазі при замиканні 10 %, 40 % і 60 % витків обмотки складає відповідно 21 %, 77 % і 89 %. При цьому спостерігається збільшення амплітуди першої гармоніки струму пошкодженої фази в 3,7...7,8 разів.

3. Результати досліджень дають змогу удосконалити системи релейного захисту синхронних генераторів, а саме захисти від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

## Список літератури

1. Sasic M., Stone G. C., Stein J., & Stinson C. Detecting turn shorts in rotor windings: A new test using magnetic flux monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2013. 19(2). Pp. 63-69. doi:10.1109/MIAS.2012.2215644
2. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., & Demian, C. Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. 65(3). 2642-2652. doi:10.1109/TIE.2017.2745408
3. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R. Stray flux multi-sensor for stator fault detection in synchronous machines. *Electronics (Switzerland)*. 2021. 10(18) doi:10.3390/electronics10182313



4. Pusca, R., Romary, R., Touti, E., Livinti, P., Nuca, I., & Ceban, A. Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*. 2021. 14(4). doi:10.3390/en14041132
5. Ehya, H., Nysveen, A., & Nilssen, R. Pattern recognition of inter-turn short circuit fault in wound field synchronous generator via stray flux monitoring. *Paper presented at the Proceedings - 2020: International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*. 2631-2636. doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270986
6. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R. Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. 55(3). 2682-2689. doi:10.1109/TIA.2019.2899560
7. Elez, A., Car, S., & Tvorčić, S. Air gap magnetic field - key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection. *International Review of Electrical Engineering*. 2013. 8(3). 981-988.
8. Afrandideh, S., Milasi, M. E., Haghjoo, F., & Cruz, S. M. A. Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. 35(1). 292-301. doi:10.1109/TEC.2019.2951528
9. Ibrahim, R. K., & Watson, S. Stator winding fault diagnosis in synchronous generators for wind turbine applications. Paper presented at the IET Conference Publications, 2016 (CP694) doi:10.1049/cp.2016.0550.
10. Melkebeek Jan A. *Electrical Machines and Drives Fundamental s and Advanced Modelling* [Electronic resource] / Jan A. Melkebeek. Springer, 2018. 734 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72730-1>

## References

1. Sasic, M., Stone, G. C., Stein, J., & Stinson, C. (2013). Detecting turn shorts in rotor windings: A new test using magnetic flux monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*, 19(2), 63-69. doi:10.1109/MIAS.2012.2215644 [in English].
2. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., & Demian, C. (2018). Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2642-2652. doi:10.1109/TIE.2017.2745408 [in English].
3. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefèvre, E., Mercier, D., & Romary, R. (2021). Stray flux multi-sensor for stator fault detection in synchronous machines. *Electronics (Switzerland)*, 10(18) doi:10.3390/electronics10182313 [in English].
4. Pusca, R., Romary, R., Touti, E., Livinti, P., Nuca, I., & Ceban, A. (2021). Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*, 14(4), doi:10.3390/en14041132 [in English].
5. Ehya, H., Nysveen, A., & Nilssen, R. (2020). Pattern recognition of inter-turn short circuit fault in wound field synchronous generator via stray flux monitoring. Paper presented at the Proceedings - 2020 : *International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*, 2631-2636. doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270986 [in English].
6. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefèvre, E., Mercier, D., & Romary, R. (2019). Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2682-2689. doi:10.1109/TIA.2019.2899560 [in English].
7. Elez, A., Car, S., & Tvorčić, S. (2013). Air gap magnetic field - key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection. *International Review of Electrical Engineering*, 8(3), 981-988.
8. Afrandideh, S., Milasi, M. E., Haghjoo, F., & Cruz, S. M. A. (2020). Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), 292-301. doi:10.1109/TEC.2019.2951528 [in English].
9. Ibrahim, R. K., & Watson, S. (2016). Stator winding fault diagnosis in synchronous generators for wind turbine applications. Paper presented at the IET Conference Publications, 2016 (CP694) doi:10.1049/cp.2016.0550 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com) [in English].
10. Melkebeek, Jan A. (2018). *Electrical Machines and Drives Fundamental s and Advanced Modelling*. Springer, 734 p. Retrieved from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72730-1> [in English].

**Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotysh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Simulation of Transient Processes of a Synchronous Generator in the Case of a Turn Short Circuit of the Stator Winding**

The purpose of this study is to develop a mathematical model of a synchronous generator to study its modes of operation in the case of asymmetric damage to the phases of the stator winding, namely twisting, the use of which will make it possible to improve relay protection systems against twisting of the stator winding of a synchronous generator.

Transverse differential protection is used to protect synchronous generators from winding circuits. However, such protection can be used only on generators with parallel branches in the phase of the stator winding. In the work, a mathematical model of a synchronous generator was developed, which allows to study the transient processes of the generator in case of the appearance of turn short circuits in the stator winding. This mathematical model is based on differential equations written for the stator phase axes a, b and c. An algorithm for calculating transient processes in a synchronous generator is proposed.

In turn-to-turn circuits of the stator winding, which is based on the fourth-order Runge-Kutt numerical integration method. With the help of the developed mathematical model, the values of currents and voltages of the generator were calculated in the case of short-circuits of the stator winding for the TVB-200-2 turbogenerator.

The results of mathematical modeling of the transient processes taking place in the TVB-200-2 generator when closing a different number of turns of the stator phase showed that the reduction of the fundamental harmonic voltage at the terminals of the generator in the damaged phase when closing 10 %, 40 %, and 60 % of the winding turns is, respectively, 21 %, 77 % and 89 %. At the same time, there is an increase in the amplitude of the first harmonic of the current of the damaged phase by 3.7 to 7.8 times. The obtained research results make it possible to improve relay protection systems for synchronous generators, namely protection against turn-to-turn circuits in stator windings without parallel branches.

**synchronous generator, turn-to-turn short-circuit, math modeling**

*Одержано (Received) 04.05.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023*