

MODELING AN AUTONOMOUS POWER PLANT WITH LONGITUDINAL-TRANSVERSE EXCITATION SYNCHRONOUS GENERATORS USING MATLAB/SIMULINK

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З СИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОГО ЗБУДЖЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Sergii M. Novohretskyi

sergii.novohretskyi@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-0240-1847

Yurii M. Baryshnyk

yurii.baryshnyk@nuos.edu.ua

ORCID: 0009-0006-5696-0846

С. М. Новогрецький,

канд. техн. наук, доцент

Ю. М. Барішник,

аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The creation of efficient and accurate mathematical simulation models of electrical devices and systems remains a relevant task for both theoretical and practical purposes.

Purpose. The aim of the paper is to develop a simulation model of an autonomous power plant with longitudinal-transverse excitation synchronous generators, diesel drives, and the necessary regulator blocks for investigation their parallel operation under variable active-inductive load conditions using MATLAB/Simulink.

Method. The synchronous generator model is based on Park's differential equations, with the three-phase stator winding transformed into a two-phase winding in the rotor-oriented dq coordinate system. The diesel engine is modeled by a torque–crank angle characteristic, taking into account inertial properties, mechanical losses, and the operation of the automatic speed governor. Voltage regulation is implemented via an automatic voltage regulator model with independent control of excitation in both longitudinal and transverse windings. The active-inductive load is represented as an equivalent generalized load consisting of series-connected passive elements. The overall structural simulation model is constructed using standard Simulink library blocks in the MATLAB software.

Results. A Simulink model of an autonomous power plant with two longitudinal-transverse excitation synchronous generators and diesel drives has been synthesized. The parallel operation of the diesel-generator units has been studied under varying loads and non-standard conditions (e.g., cylinder misfires). Steady-state and transient response plots have been obtained and analyzed.

Scientific novelty. The novelty of this work lies in the development of a simulation model of an autonomous power plant with longitudinal-transverse excitation synchronous generators that accounts for the nonlinear output torque of piston drives under variable active-inductive load conditions.

Practical importance. The developed simulation model can be used to study the dynamic behavior of autonomous power plants with one, two, or more two-axis excitation synchronous generators. Investigations may include both standard transients and dynamic modes under abnormal operation of a specific generator, drive, or regulator. The model enables analysis of active power oscillations and their interactions.

Key words: autonomous power plant; longitudinal-transverse synchronous generator; Park's equation; power system dynamics; modeling in MATLAB/Simulink.

Анотація. В теоретичних і практичних цілях завжди актуальною задачею є створення ефективних і точних математичних імітаційних моделей електротехнічних пристроїв і комплексів.

Мета. Метою роботи є розробка імітаційної моделі синхронного генератора з поздовжньо-поперечним збудженням, дизельним приводом і необхідними блоками регуляторів для моделювання паралельної роботи таких агрегатів в автономній електростанції зі змінним активно-індуктивним навантаженням у програмному середовищі MATLAB/Simulink.

Методика. Математична модель синхронного генератора побудована на основі диференціальних рівнянь Парка-Горева з приведенням реальної трифазної обмотки статора до двофазної обмотки в рухомій системі координат.

нат dq , жорстко зв'язаної з ротором. Модель дизельного двигуна представлена графіком залежності моменту КШМ від кута оберту колінчатого валу з врахуванням інерційних властивостей, механічних втрат та дії автоматичного регулятора швидкості. Система регулювання напруги реалізована через модель автоматичного регулятора напруги з незалежним регулюванням збудження генератора в поздовжній і поперечній обмотках. Активно-індуктивне навантаження представлено у вигляді еквівалентного узагальненого із послідовним з'єднанням пасивних елементів. В цілому структурна імітаційна модель складена з використанням базових блоків бібліотеки Simulink у середовищі MATLAB.

Результати. Виконано синтез Simulink-моделі автономної електростанції з двома генераторами поздовжньо-поперечного збудження та дизельними приводами. Проведено дослідження паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів при зміні навантаження та нештатних ситуаціях (пропуски запалення в циліндрі), наведені графіки усталеного режиму і перехідних процесів.

Наукова новизна полягає у розробці імітаційної моделі автономної електростанції з синхронними генераторами поздовжньо-поперечного збудження та врахуванні нелінійності вихідного моменту поршневих приводів при роботі автономної електростанції зі змінним активно-індуктивним навантаженням.

Практична значимість отриманих результатів полягає у використанні розробленої імітаційної моделі для дослідження динамічних режимів автономних електростанцій з одним, двома або більше синхронними генераторами двоосного збудження. Дослідження можуть включати як штатні перехідні процеси, так і динамічні режими при нештатній роботі конкретного генератора, привода та/або регулятора. Отримана модель дозволяє досліджувати обмінні коливання активної потужності.

Ключові слова: автономна електростанція; синхронний генератор поздовжньо-поперечного збудження; рівняння Парка-Горєва; динаміка електроенергетичних систем; моделювання в MATLAB/Simulink.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В умовах перебоїв електропостачання в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України та її перевантаження, зумовлених бойовими діями та атаками на об'єкти енергетичної інфраструктури, актуальності набуває використання автономних джерел електроенергії як ефективного заходу по забезпеченню безперебійної роботи об'єктів критичної інфраструктури. При дослідженні автономної електростанції також слід звернути увагу і на специфіку суднових електроенергетичних установок, для яких робота у «острівному» режимі є базовою. Кількість генераторних агрегатів у складі автономних електростанцій не обмежується одним, а зазвичай становить два або три (включаючи резервний) і у деяких випадках (як наприклад суднова електростанція) може становити більше чотирьох [1]. Стосовно типу приводу – двигуни внутрішнього згоряння сьогодні залишаються поза конкуренцією як найбільш універсальні енергетичні машини для приводу енергетичних установок [2; 3], а синхронні генератори становлять переважну більшість серед електричних машин, що застосовуються в електростанціях [4; 5].

Підтримання належних параметрів в автономній електромережі з паралельно працюючими генераторами є технічно складнішою задачею ніж регулювання генераторного агрегату при роботі на загальну мережу умовно нескінченної потужності. По-перше складність викликана динамічними режимами та перехідними процесами при підключенні навантаження співмірного з потужністю синхронних генераторів [5]. По-друге – можливими нештатними ситуаціями в окремому генеруючому агрегаті, що

спричиняють аварійність всієї електростанції, зниження генеруючої потужності або стійкості [6].

В свою чергу використання генераторів з додатковою обмоткою збудження в поперечній осі, що зсунута на $\pi/2$ електричних градусів відносно основної, дозволяє розширити можливості керування, а також підвищити стійкість системи, зменшити саморозкачування генератора, ефективно демпфувати синхронні та асинхронні складові самозбудження та зменшувати амплітуду коливальних режимів [7; 8].

Стандартним методом дослідження динамічних режимів вищезазначених електромеханічних систем та агрегатів є моделювання в спеціалізованому програмному забезпеченні за виведеними диференціальними рівняннями. Запропонована в цій статті модель є необхідним інструментом для дослідження паралельної роботи синхронних генераторів поздовжньо-поперечного збудження, стійкості системи і аналізу динаміки автономних електростанцій, а розробка такої імітаційної моделі є актуальною задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розробники ПЗ пропонують значний перелік прикладних програм (наприклад MATLAB/Simulink, ANSYS Maxwell, LabVIEW/Control Design and Simulation, etc), що дозволяють моделювати складні динамічні системи, описані диференціальними рівняннями [9]. Наприклад, в бібліотеці Simulink представлений значний перелік синхронних машин, що дозволяють отримати достовірні результати при моделюванні електромагнітних та електромеханічних систем [10]. У той же час ці стандартні моделі мають обмежені можливості імітування машин нетрадиційної

конструкції: безконтактних [9], з багатообмотковими статорами, з гібридними системами збудження [11], з додатковою незалежною обмоткою збудження у поперечній осі та ін.

В статті [12] представлено дослідження двообмоткового синхронного генератора з подвійним збудженням (DESG) для вітроенергетичних установок та запропоновано стратегію керування на основі ковзної частоти. Моделювання виконано в середовищах ANSYS Maxwell та ANSYS Twin Builder методом спільної перехідної симуляції. Використання MATLAB-моделі або уніфікованої математичної моделі для подальших досліджень у роботі не наведено.

У роботі [13] представлено моделювання динамічних рівнянь синхронної машини з явнополюсним ротором із використанням спрощених алгоритмів та вбудованих функціональних блоків середовища MATLAB на основі рівнянь усталеного режиму та dq -моделей. Реалізовано замкнену систему керування швидкістю з PI-регулятором і ШІМ-інвертором. Моделювання показало зростання активної та реактивної потужності зі збільшенням збудження та короткочасне зниження швидкості й моменту при трифазному замиканні.

У [14] розроблено динамічну математичну модель синхронного двигуна з явнополюсним ротором у dq -координатах та реалізовано її в середовищі MATLAB/Simulink із використанням Embedded MATLAB Function. Отримано перехідні характеристики швидкості, моменту та потужності. Модель орієнтована на режим двигуна і не передбачає розширення для моделювання генератора або додавання додаткових обмоток збудження, зокрема в поперечній осі.

У роботах [15; 16] зазначено, що для більш достовірних результатів моделювання електромеханічної системи «ДВЗ-генератор» слід враховувати нелінійність вихідного обертового моменту приводу.

Варто також зазначити, що моделюванню автономних електростанцій з генераторами поздовжньо-поперечного збудження в середовищі Simulink, як показав огляд публікацій, належними чином увага не приділялася.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

В стандартних бібліотеках Simscape Simulink реалізовані синхронні машини з класичною системою одноосного збудження, або збудження від постійних магнітів, якими неможливо повноцінно відтворити електромеханічні та електромагнітні процеси синхронних машин поздовжньо-поперечного збудження. Для дослідження динамічних режимів в автономних електростанціях з такими синхронними генераторами необхідно математично описати і синтезувати імітаційну модель з базових блоків. Крім того, для дослідження роботи генераторів на навантаження та динаміки системи при їх паралельній роботі, імітаційну модель електростанції необхідно доповнити

моделями приводів, регуляторів і навантаження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка імітаційної моделі синхронного генератора з поздовжньо-поперечним збудженням, дизельним приводом і необхідними блоками регуляторів для моделювання паралельної роботи таких агрегатів в автономній електростанції зі змінним активно-індуктивним навантаженням у програмному середовищі MATLAB/Simulink.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є автономна електростанція з синхронними генераторами поздовжньо-поперечного збудження, дизельними приводами та активно-індуктивним навантаженням.

Предметом дослідження є електромеханічні перехідні процеси.

Методи дослідження. Імітаційна модель реалізована у середовищі MATLAB/Simulink з використанням базових блоків і поділом на підсистеми: генератор поздовжньо поперечного-збудження, привод, регулятор збудження, навантаження. Математична модель синхронного генератора представлена диференціальними рівняннями Парка-Горєва та рівняннями потокозчеплень обмоток, записаними у матричних формах. Попередньо системи диференціальних рівнянь подані у нормальній формі Коші з приведенням трифазної обмотки статора до жорстко зв'язаної з ротором системи координат dq . Окремим блоком включена модель автоматичного регулятора напруги (АРН), що реалізована двома незалежними гілками регулювання збудження по кожній обмотці. Для моделювання вихідного обертового моменту ДВЗ використаний графік залежності моменту КШМ від кута оберту колінчатого валу з врахуванням інерційних властивостей, механічних втрат та дії автоматичного регулятора швидкості (АРШ). Активно-індуктивне навантаження представлено у вигляді еквівалентного узагальненого із послідовним з'єднанням пасивних елементів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ.

Побудова моделі синхронного генератора двоосного збудження.

При моделюванні синхронних генераторів з симетричною електромагнітною системою приведення статорних обмоток до осей ротора d та q є найоптимальнішим рішенням з точки зору математичного викладення [17]. Система диференціальних рівнянь, де три нерухомі фазні обмотки статора замінені двома еквівалентними контурами, що обертаються разом з ротором, має назву рівнянь Парка-Горєва. Проте, перед записом рівнянь необхідно означити прийняті допущення, які дають можливість з достатньою точністю замість реальної машини досліджувати ідеалізовану синхронну машину [5; 17]:

- електрична машина є двополюсною та має магнітну і електричну симетрію;
- генератор вважається ненасиченим, а залежність між МРС і потоком приймається лінійною;
- розподіл магнітної індукції та МРС синусоїдальний, вищі гармоніки не враховуються;
- досліджувана модель вважається збалансованою, тому нульова компонента при перетвореннях Парка-Горєва дорівнює нулю.

Нижче наведено диференційне рівняння Парка-Горєва у нормальній формі Коші з введеними постійними часу демпферних обмоток та обмоток збудження:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{dt} = u_d - (r_a i_d) + (-\dot{\omega} \Psi_q); \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = -u_q - r_a i_q + \dot{\omega} \Psi_d; \\ \frac{d\Psi_{fd}}{dt} = \frac{u_{fd}}{T_{0d}} - \frac{1}{T_{0d}} i_{fd}; \\ \frac{d\Psi_{fq}}{dt} = \frac{u_{fq}}{T_{0q}} - \frac{1}{T_{0q}} i_{fq}; \\ \frac{d\Psi_{ld}}{dt} = 0 - \frac{1}{T_{ld}} i_{ld}; \\ \frac{d\Psi_{lq}}{dt} = 0 - \frac{1}{T_{lq}} i_{lq}, \end{cases} \quad (1)$$

де індексом d визначені параметри синхронного генератора в поздовжній осі; q – в поперечній осі; Ψ – потокозчеплення обмоток якоря; Ψ_f – потокозчеплення обмоток індуктора; Ψ_l – потокозчеплення демпферних обмоток; u – напруга обмоток якоря; u_f – напруга обмоток індуктора; u_l – напруги демпферних обмоток; i – струми обмоток якоря; i_f – струми обмоток індуктора; i_l – струми демпферних обмоток; ω – кутова швидкість ротора; r_a – активний опір обмоток якоря; T_0 – постійні часу обмоток індуктора; T_l – постійні часу демпферних обмоток.

В нижченаведеному рівнянні потокозчеплень обмотки ротора попередньо приведені до фіктивних обмоток статора за принципом еквівалентності повної потужності реальної і приведені обмоток.

$$\begin{cases} \Psi_d = -x_d i_d + i_{fd} + i_{ld}; \\ \Psi_q = x_q i_q - i_{fq} + i_{lq}; \\ \Psi_{fd} = i_{fd} - k_{sfd} x_{ad} i_d + k_{sfd} i_{ld}; \\ \Psi_{fq} = i_{fq} - k_{sfq} x_{aq} i_q - k_{sfq} i_{lq}; \\ \Psi_{ld} = i_{ld} - k_{sld} x_{ad} i_d + k_{sld} i_{fd}; \\ \Psi_{lq} = i_{lq} + k_{slq} x_{aq} i_q - k_{slq} i_{fq}, \end{cases} \quad (2)$$

де індексом d визначені параметри синхронного генератора в поздовжній осі; q – в поперечній осі; x – власні індуктивні опори обмоток якоря; x_a – індуктивні опори взаємодії; k_{sf} – коефіцієнти приведення індуктивного опору обмотки індуктора до обмотки

статора; k_{sl} – коефіцієнти приведення індуктивного опору демпферних обмоток до обмотки статора.

Системи диференційних рівнянь Парка-Горєва (1) та рівнянь потокозчеплень (2) можуть бути компактно представлені у матричних формах. Такий підхід не лише робить їх зручними для сприйняття, а й спрощує аналіз складових та дозволяє ефективно реалізувати модель у MATLAB/Simulink.

Матрична форма системи диференційних рівнянь Парка-Горєва (1) та рівнянь потокозчеплень (2):

$$\begin{cases} \left[\frac{d\Psi}{dt} \right] = [u] - [RT] \times [i] + [\dot{\omega}] \times [\Psi]; \\ [\Psi] = [KX] \times [i]. \end{cases}$$

В попередніх рівняннях використані матриці:

$$[u] = \begin{bmatrix} u_d & -u_q & \frac{1}{T_{0d}} u_{fd} & \frac{1}{T_{0q}} u_{fq} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$[i] = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_{fd} & i_{fq} & i_{ld} & i_{lq} \end{bmatrix}^T;$$

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \Psi_d & \Psi_q & \Psi_{fd} & \Psi_{fq} & \Psi_{ld} & \Psi_{lq} \end{bmatrix}^T;$$

$$[RT] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{0d}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{0q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ld}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{lq}} \end{bmatrix};$$

$$[\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[KX] = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_q & 0 & -1 & 0 & 1 \\ (-k_{sfd} x_{ad}) & 0 & 1 & 0 & k_{sfd} & 0 \\ 0 & (-k_{sfq} x_{aq}) & 0 & 1 & 0 & -k_{sfq} \\ (-k_{sld} x_{ad}) & 0 & k_{sld} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_{slq} x_{aq} & 0 & -k_{slq} & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де $[u]$ – матриця напруг; $[i]$ – матриця струмів; $[\Psi]$ – матриця потокозчеплень; $[RT]$ – діагональна матриця активних опорів і постійних часу; $[\omega]$ – матриця кутових швидкостей ротора, що є складовою лише рівнянь статорних обмоток та формує так звані

«обертові ЕРС»; $[KX]$ – матриця коефіцієнтів приведення та реактивних опорів.

Після виконання математичних перетворень та приведення до форми Коші відносно потокозчеплень рівняння електричної частини синхронного генератора можуть бути переписані наступним чином:

$$\left[\frac{d\Psi}{dt} \right] = [u] - ([RT] \times [KX]^{-1} - [\omega]) \times [\Psi]. \quad (3)$$

Simulink-модель синхронного генератора, побудована за рівнянням (3), представлена на рис. 1. Модель машини побудована як джерело струму, де входними сигналами є масив напруг та кутова частота, а вихідними – електромагнітний момент та фіктивні струми статора i_d та i_q .

Побудова моделі механічної частини ДГ.

З позиції аналітичної динаміки, кінематична схема «приводний дизель-синхронний генератор» може бути заміщена різними типами крутильних схем, що відрізняються кількістю умовних акумуляторів кінетичної енергії. В математичній моделі використано одномасову схему, яка включає в себе всі моменти інерції обертових мас приводного дизельного агрегату, ротору генератора та валу і муфти між ними та виражена через постійну часу T_J сумарного моменту інерції. Рівняння моментів агрегату як рівняння механічної рівноваги по принципу Даламбера [8] запишемо:

$$M_{MEX} - M_{EM} - T_J \frac{d\omega}{dt} - M_{BT} = 0, \quad (4)$$

де M_{MEX} – обертовий момент дизельного двигуна; M_{EM} – електромагнітний момент генератора; M_{BT} – момент в'язкого тертя.

Двигуни внутрішнього згоряння створюють змінний обертовий момент в залежності від кута повороту кривошипно-шатунного механізму (КШМ) через наявність періодично діючих сил від тиску газів і сил інерцій поступально-рухомих мас КШМ. Ці сили викликають нерівномірні малі коливання кутової швидкості колінчатого валу відносно середнього значення і нелінійність обертового моменту [2; 3], що необхідно враховувати при дослідженні динаміки автономних дизель-генераторних електростанцій. Обертовий момент M_{MEX} є алгебраїчною сумою нелінійних моментів, що створюються кожним окремим поршнем ДВЗ з врахуванням порядку їх робочих тактів. На рис. 2 наведено графік (крива 1) обертового моменту в залежності від кута повороту колінчатого валу α в діапазоні $0 \dots 4\pi$ повного робочого циклу, що характерний для 4-циліндрового дизельного двигуна на потужність 60...400 к.с. [2; 3]. На кривій 2 спостерігаємо провал моменту як результат нештатної роботи ДВЗ – несправності 1-го циліндру. Кривими 3 та 4 вказано середні значення моментів справного і несправного приводного двигуна, що зазвичай використовуються в розрахунках і параметрах агрегату.

В моделі момент M_{MEX} реалізований блоком Lookup table(1-D T(u)), де входом є реальний кут положення валу.

Сумарні механічні втрати (в тому числі крутильних коливань, вентиляційних, аеродинамічних і т.д.) представлені як втрати в'язкого тертя, тобто в лінійній залежності від швидкості обертання ротора з узгальненим коефіцієнтом:

$$M_{BT} = B\omega,$$

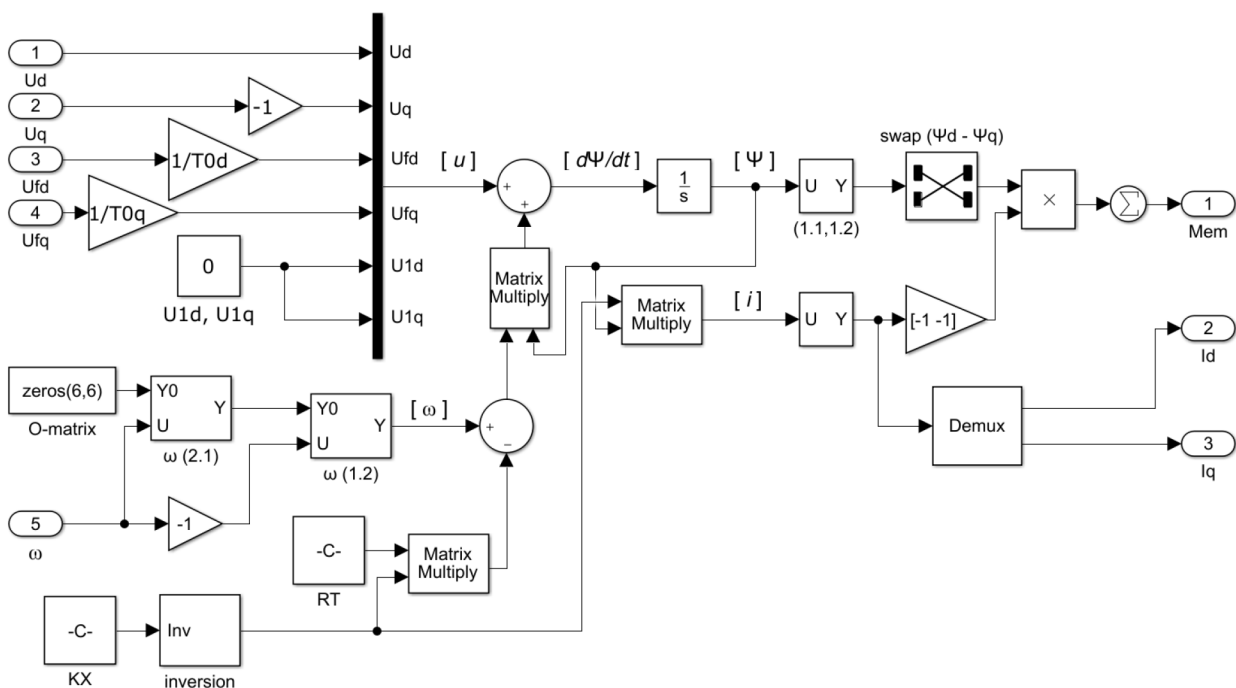


Рис. 1. Simulink-модель синхронного генератора поздовжньо-поперечного збудження

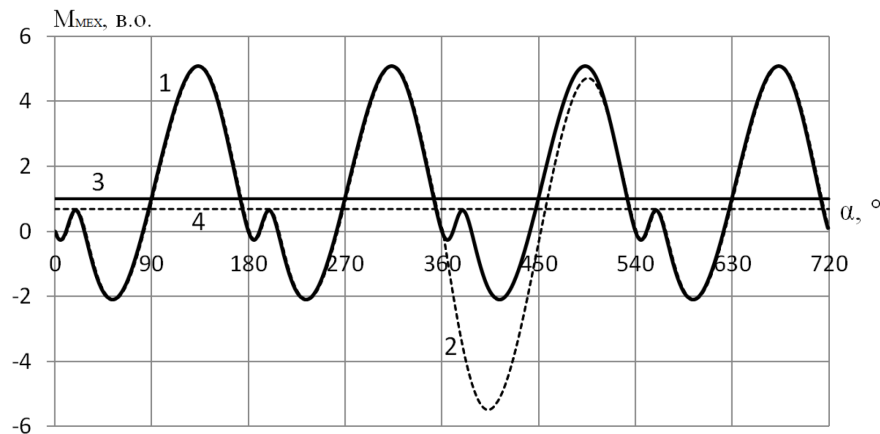


Рис. 2. Обертові моменти 4-циліндрового дизельного двигуна (1 – справного; 2 – з несправним циліндром; 3 – усереднений справного двигуна; 4 – усереднений двигуна з несправним циліндром)

де $M_{\text{вт}}$ – момент в'язкого тертя; B – коефіцієнт в'язкого тертя; ω – кутова швидкість ротора.

На рис. 3 представлена Simulink-модель механічної частини агрегату, де вхідними величинами є номінальний обертовий момент ДВЗ та електромагнітний момент. Вихідними величинами є кут положення ротора та кутова швидкість, яка в досліджуваній двополосній моделі еквівалентна кутовій частоті генератора.

Для синхронних генераторів характерний попередній розгін до близько синхронної швидкості перед введенням в схему і синхронізацією [4]. В представленій моделі блоком ω_{st} реалізоване початкове значення частоти обертання для математичного моделювання. Змінюючи його значення можна дослідити динаміку системи як при синхронізації, так і при пуску генераторного агрегату. Функція $f(0..4\pi)$ обмежує приріст кута повороту валу значенням до 4π , тобто до двох обертів повного циклу колінчатого валу. Кут γ в модельованому двополосному генераторі відповідає електричному куту. Блоками ω_{ref} , $PID(s)$ та $Saturation$ реалізований регулятор швидкості, а складові $TransferFcn$ з постійною часу T та $Backlash$

моделюють інерційність та люфт механічної частини АРШ.

Моделювання системи регулювання збудження синхронного генератора в двох осях.

Незалежне регулювання збудження синхронного генератора по осям d та q значно підвищує динамічну стійкість машини [18]. Регулювання в поздовжній осі доцільно виконати за відхиленням від уставки номінальної напруги статора U , що характерно для синхронних генераторів традиційного виконання. В поперечній осі найбільш ефективним з точки зору демпфування механічних коливань є керування за відхиленням від 0 значення кута вибігу ротора (або ж кута зміщення ротору) [17]. Варто зазначити, що для машин одноосевого збудження кут вильоту ротора дорівнює куту навантаження [5; 8] і може мати нульове значення лише в режимі ідеального неробочого руху.

Simulink-модель автоматичного регулятора напруги (АРН) генератора двоосевого збудження представлена на рис. 4. До моделі додані блоки, що враховують насичення та інерційність регулятора – $Saturation$ та $TransferFcn$ з постійними часу T_d та T_q .

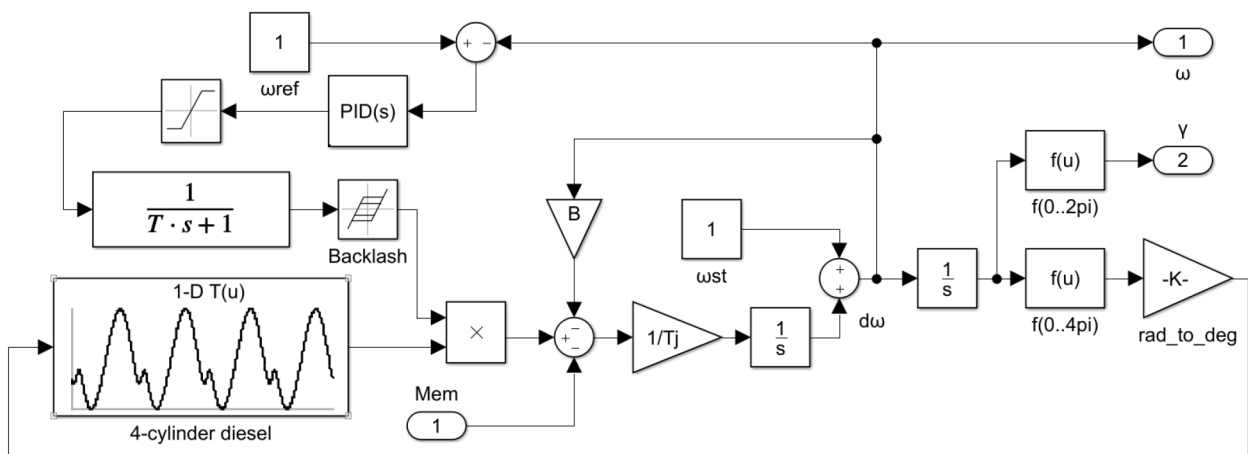


Рис. 3. Simulink-модель механічної частини ДГ

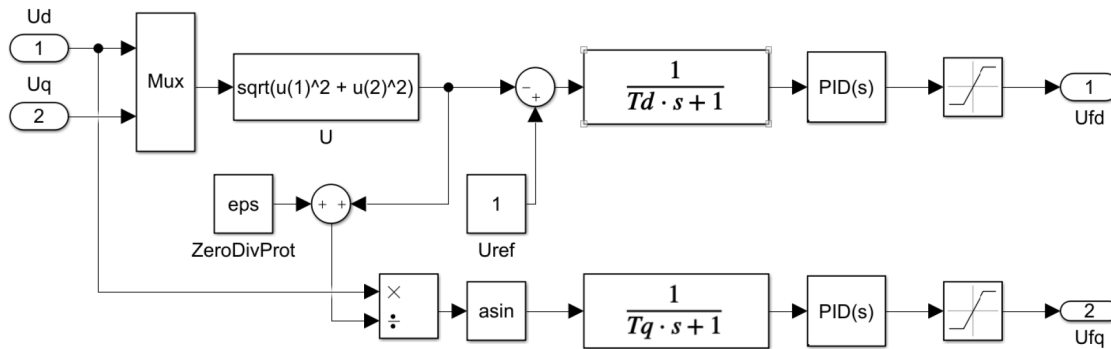


Рис. 4. Simulink-модель АРН

Імітаційна модель автономної електростанції та результати експериментів моделювання.

Спільне навантаження для змодельованих дизель-генераторних агрегатів в автономній електростанції виконане стандартними блоками Simulink послідовно з'єднаного активного R_{load} та індуктивного L_{load} навантаження симетричних у кожній фазі за диференціальним рівнянням:

$$U = R_{load}i + L_{load} \frac{di}{dt}.$$

Зважаючи на метод побудови моделі генератора як джерела струму, відсутня можливість моделювання роботи окремого генератора при неробочому русі. Тому пускове навантаження прийняте активним в 10 % від

номінального. Блоком *Switch* реалізоване підключення навантаження через час, встановлений у блоці *Step*.

Приведення струмів і напруг до осей ротора або статора реалізовано стандартними блоками Simulink прямого та оберненого перетворення Парка.

На рис. 5 показана імітаційна модель автономної електростанції з двома дизель-генераторними агрегатами поздовжньо-поперечного збудження, що працюють на спільне активно-індуктивне навантаження.

Моделювання виконано для електростанції з двома ідентичними генераторами, параметри яких у відносних одиницях відповідають типовому ряду синхронних машин потужністю 100...250 кВА. та розраховані за [8]. Параметри зведені в Таблицю 1.

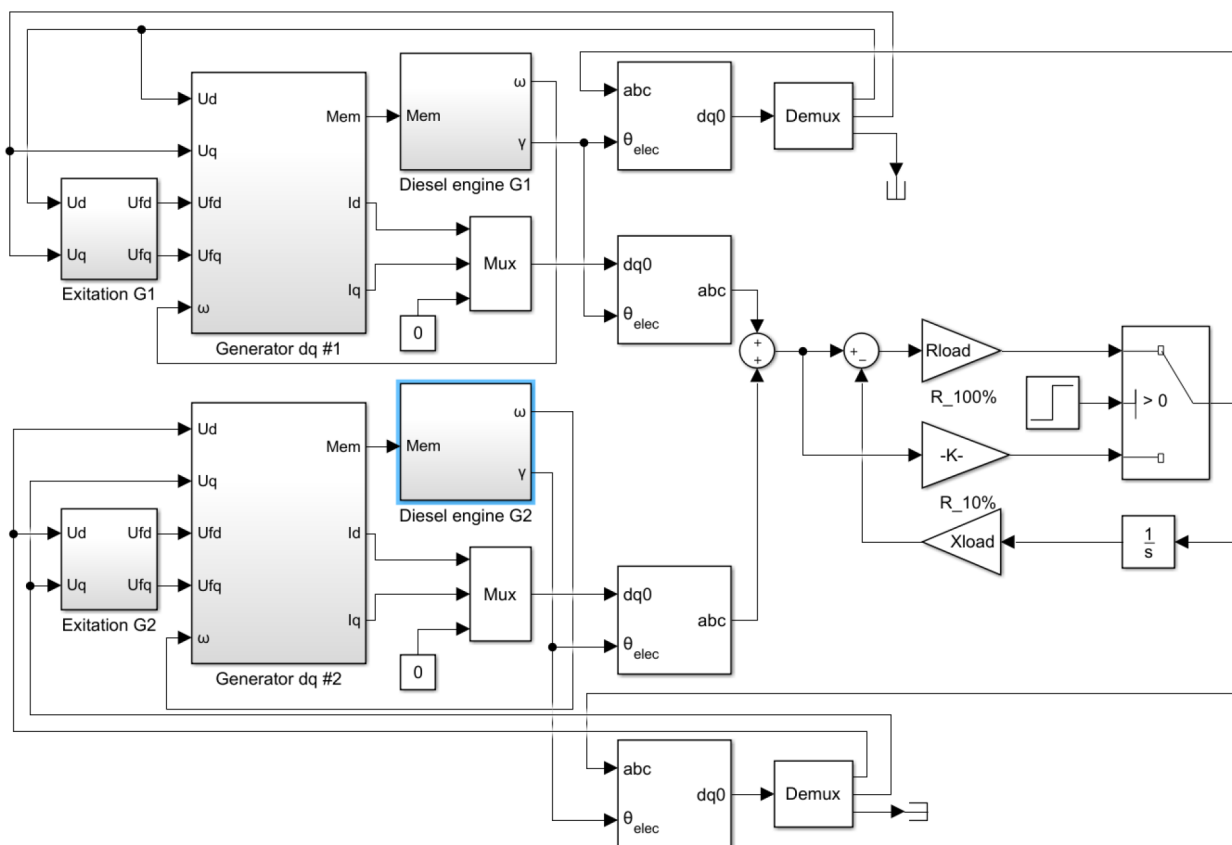


Рис. 5. Імітаційна Simulink-модель автономної електростанції

Таблиця 1. Параметри синхронного генератора

Параметр	Значення	Параметр	Значення	Параметр	Значення
x_d, x_q	2 в.о.	k_{sfd}, k_{sfq}	0,947	T_{0d}	1000 рад
x_{ad}, x_{aq}	1.9 в.о.	k_{s1d}	0,932	T_{0q}	1000 рад
r_a	0,02 в.о.	k_{s1q}	0,958	T_{1d}	47,657 рад
ω	314 рад/с	T_l	2000 рад	T_{1q}	46,381 рад

Параметр насичення (*Saturation*) для АРШ прийнято рівним 2,5, що відповідає рекомендованому граничному короточасному перевантаженню дизельних агрегатів у перехідних режимах [3]. Для АРН параметр насичення встановлюється не більше 7 за граничною форсувальною здатністю системи збудження синхронного генератора [5].

На рис. 6 наведено графік зміни кутової частоти генератора при навантаженні в розмірі 100 % потужності електростанції в момент часу 628 радіан (2 секунди) з коефіцієнтами підсилення ПП-регулятора пропорційним $k_p = 20$ та інтегральним $k_i = 1,5$, а також люфтом (*Backlash*) 2 % в АРШ.

На рис. 7 представлені графіки активної потужності генераторів та обмінні коливання між ними в змодельованому режимі:

- час 0 радіан (0 секунд) початкова кутова швидкість 1 в.о. та навантаження 10 % потужності електростанції;
- час 314 радіан (1 секунда) підключено активно-індуктивне навантаження величиною 2/3 потужності електростанції;
- час 628 радіан (2 секунди) аварійна ситуація у дизельному приводі агрегату № 2 – вихід з ладу 1-го циліндру (дизель «троїть»).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Графік перехідного процесу зміни кутової частоти рис. 6 при ступінчастому збільшенні навантаження має характерний провал з подальшим відновленням до значення уставки ω_{ref} . Зміна кутової швидкості

становить $-2,2 \% \dots + 0,8 \%$, а тривалість перехідного процесу приблизно 3...3,5с.

Графіки активної потужності рис. 7 показують рівномірний розподіл навантаження між синхронними генераторами в нормальних умовах та перерозподіл навантаження при зміні вихідного моменту дизельного приводу № 2. В нормальних режимах присутні обмінні коливання активної потужності, що становлять 9,5 % потужності генератора. Проте в нештатних режимах, що моделюється як зміна середнього значення механічного моменту та форми його кривої, спостерігається збільшення амплітуди обмінних коливань до 32,2 % від потужності генератора. Частота обмінних коливань становить приблизно 2,47 Гц, що відповідають частоті власних коливань генераторного агрегату і викликані зокрема модельованими люфтами в АРШ агрегату № 2.

Закон керування збудженням в поперечній осі побудований на принципі роботи генератора двохосного збудження з кутом вильоту ротора близьким до нуля, а в поздовжній – за відхиленням напруги. Керування збудження в поперечній обмотці має ефективно гасити механічні коливання, а в поздовжній обмотці – електромагнітні коливання. Проте наявність саме обмінних коливань доводить необхідність модернізації АРН в частині введення в закон керування збудження поперечної обмотки додаткових ланок, як наприклад за активною потужністю обмінних коливань та/або відхиленням кутової частоти. Саме розробка та дослідження таких удосконалених законів керування становить основний напрямок нашої

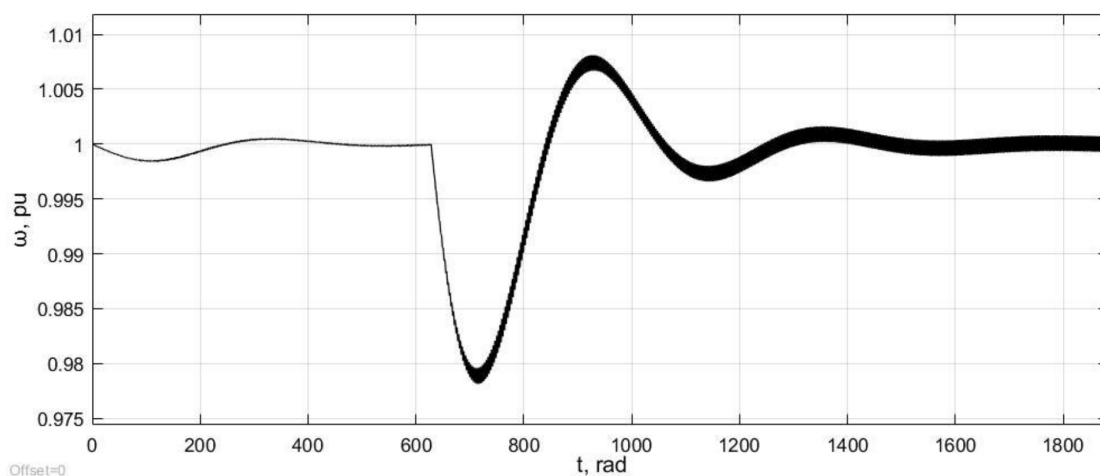


Рис. 6. Графік кутової частоти генератора при підключенні навантаження

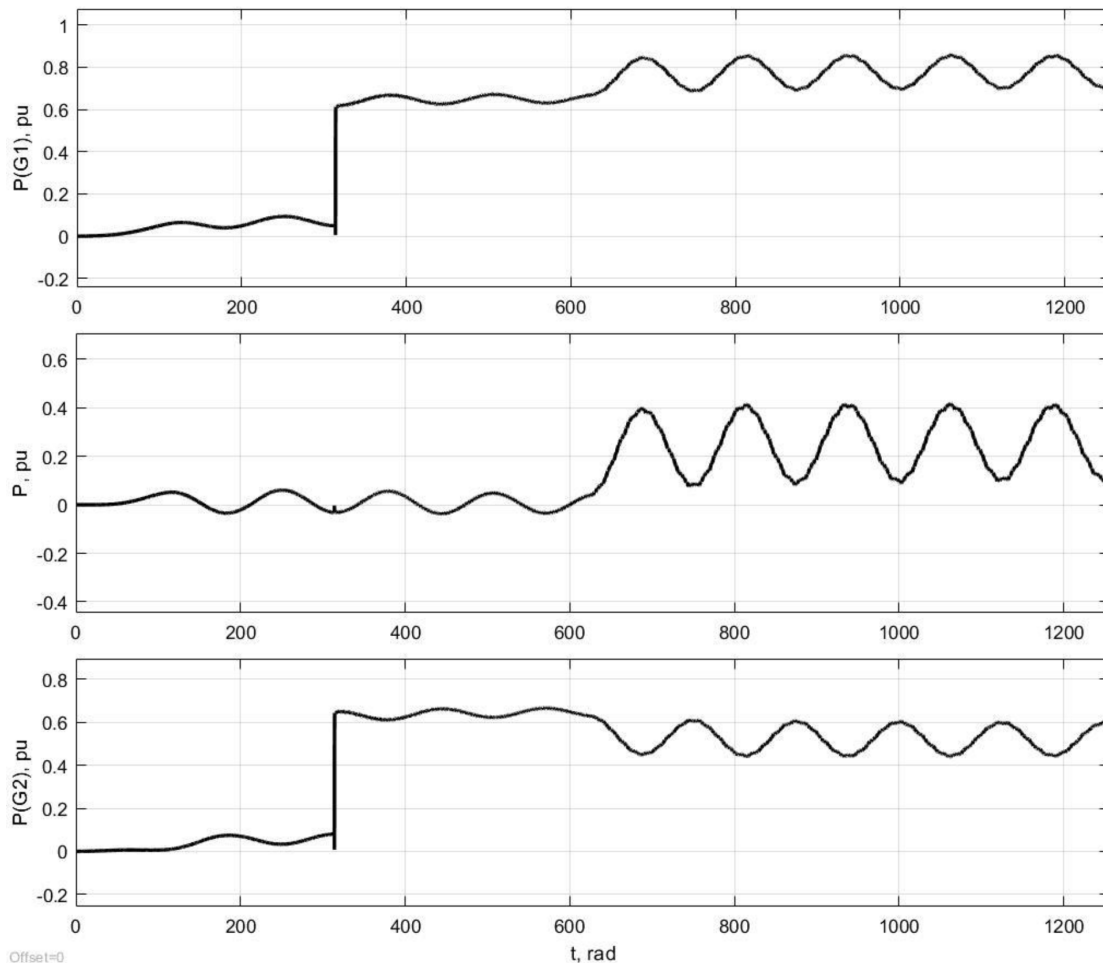


Рис. 7. Активна потужність генераторів (графіки 1 та 3) та обмінні коливання між ними (графік 2)

роботи, а майбутні дослідження будуть зосереджені на їх реалізації та аналізі ефективності для зменшення амплітуди обмінних коливань активної потужності.

Додатковою перевагою синтезованої моделі є можливість варіювання значним переліком параметрів синхронного генератора, приводу, навантаження, регуляторів АРШ і АРН та вводити блоки моделювання затримок, збурень і завод. Така модальність дозволяє отримати широкий діапазон сімейств графіків при моделюванні ustalених і динамічних режимів відповідно до обраних об'єкту і предмету дослідження в автономних електростанціях.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано імітаційну Simulink-модель автономної електростанції з генераторами поздовжньо-поперечного збудження як апарат дослідження перехідних процесів та стійкості системи. Модель має значний перелік варіативних параметрів генератора, приводу і регуляторів та дозволяє досліджувати динаміку при зміні величини і характеру навантаження, вводити блоки моделювання несправностей та збурень.

Проведене моделювання показало, що при ступінчастому збільшенні навантаження кутова швидкість синхронної машини має характерні відхилення у межах $-2,2 \dots +0,8 \%$ та відновлення до встановлених параметрів за $3 \dots 3,5$ с. Аналіз активної потужності підтвердив рівномірний розподіл навантаження між генераторами в нормальних режимах та перерозподіл при зміні моменту дизельного приводу № 2. У штатних умовах амплітуда обмінних коливань сягнула $9,5 \%$, тоді як у нештатних режимах вона зросла до $32,2 \%$ із частотою близько $2,47$ Гц, що свідчить про чутливість системи до швидких змін механічного моменту та необхідність врахування цих ефектів при проектуванні та регулюванні генераторних систем.

Необхідність синтезу моделі обумовлена потребою в математичному апараті та засобі моделювання для вивчення проблематики зменшення амплітуди коливань активної потужності в автономних електростанціях, що і є напрямком нашого дослідження. Модель буде використана для визначення та дослідження факторів, що спричиняють та підсилюють обмінні коливання активної потужності, а також перевірки технічних рішень по їх зменшенню.

REFERENCES

- [1] Patel, M. R. (2012). *Shipboard electrical power systems (2nd ed.)*. CRC Press.
- [2] Slynko G., Ryaboshapka N., Sukhonos R., Yevseeva N., Soldatchenkov O. (2024). Doslidzhennya vplyvu propuskiv zapalyuvannya na nerivnomirnist' obertannya benzynovoho dvyhuna [Study of the influence of misfires on the uneven rotation of a gasoline engine]. *Novi materialy ta tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, pp. 82–88. Zaporizhzhya : NU “Zaporiz'ka politekhnika” [in Ukrainian].
- [3] Nalivayko, V. S., Tymoshevskiy, B. H., Tkachenko, S. H. (2015). *Sudnovi dvyhuny vnutrishnyoho zghoriannia [Marine internal combustion engines]*. Mykolaiv : Torubara V. V. [in Ukrainian].
- [4] Sørensen, A. J., Hansen, J. F. (2015). *Designing the electric energy system of ships (2nd ed.)*. The Institute of Marine Engineering, Science & Technology (IMarEST).
- [5] Ostashevskiy, M. O., & Yurieva, O. Yu. (2018). *Elektrychni mashyny i transformatory [Electric machines and transformers]*. Kyiv, Ukraine: Karavela. [in Ukrainian].
- [6] Islam, M. M. (2014). *Shipboard power systems design and verification fundamentals*. Wiley-IEEE.
- [7] Xu, G., Hu, Y., Hao, X., Zhan, Y., Zhao, H., Liu, X., & Luo, Y. (2018). The relationship of magnetomotive force under different excitation modes of dual-excited synchronous generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 8200704.
- [8] Podymaka, V. I., & Novohrets'kyi, S. M. (2013). *Matematychni modelyuvannya perekhidnykh protsesiv v elektroenerhetychniy systemi [Mathematical modeling of transient processes in power systems]*. Mykolaiv : NUK. [in Ukrainian].
- [9] Zenovych, O., Vasylenko, R., Heorhiiev, Y., Eidulshtein, H., & Payanok, O. (2024). Virtual model of a contactless alternating current generator [Virtual'na model' bezkontaktynogo generatora zminnoho strumu]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu – Bulletin of Khmelnytskyi National University*, Issue 6 (Vol. 1). [in Ukrainian].
- [10] MathWorks (2026). Matlab: Simulink Simscape Electrical: User's Guide. <https://www.mathworks.com/help/sps/index.html>
- [11] Kutsyk, A. S., Pinchuk, Y. M., & Lishchuk, A. S. (2024). Matematychna model' bahatoobmotkovoi synchronnoi mashyny z hybridnym zbudzhenniam [Mathematical model of a multi-winding synchronous machine with hybrid excitation]. *Visnyk Natsional'noho universytetu “L'viv's'ka politekhnika”. Seriya: “Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy” – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: “Power and Electromechanical Systems”*, (1(7)), 62–71. [in Ukrainian].
- [12] Agarala, A., Bhat, S. S., Zychma, D., Sowa, P. (2024) A novel approach to using dual-field excited synchronous generators as wind power generators. *Energies*, 17, 456.
- [13] Crescent Onyebuchi Omeje, Stephen Ejiofor Oti (2022) Dynamic Analysis of Synchronous Machine at Varied Excitation Voltage and Quadrature axis Reactance. *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering*, Vol. 10, Issue.2, pp. 16–29.
- [14] C.O. Onah, and J. Reuben (2016) Dynamic Modeling and Simulation of Salient Pole Synchronous Motor Using Embedded Matlab. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. Vol. 5, Issue 12, pp. 318–325.
- [15] Lomakin V. (2018). Zminennya nerivnomirnosti khodu dvyhuna vnutrishn'oho zhoryannya udoskonalenniam konstruktsiyi makhovyka. Avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovooho stupenya kandydata tekhnichnykh nauk za spetsial'nistyu 05.05.03 Dvihuny ta enerhetychni ustanovky [Changing the unevenness of the internal combustion engine stroke by improving the flywheel design. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.05.03 Engines and power plants]. Na pravah rukopysu – On manuscript rights, p.21. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
- [16] Mobarra, M., Rezkallah, M., Ilincă, A. (2022). Variable speed diesel generators: Performance and characteristic comparison. *Energies* 15, 592.
- [17] Novohrets'kyi, S. M. (2010). *Rehul'uvannya zbudzhennya synchronnoho generatora u poperechniy osi dlya pidvyshchennya stiykosti roboty sudnovoyi elektrostattantsiyi [Excitation control of a synchronous generator in the transverse axis to improve the stability of a ship power plant]*. Candidate of Technical Sciences dissertation. National University “Odesa Polytechnic”, Ukraine. [in Ukrainian].
- [18] Novohrets'kyi, S. M., Kostyuchenko, V. I., & Baryshnyk, Yu. M. (2025). Vplyv staloï chasu pozdovzhnoï obmotky zbudzhennya na statychno stiykist' paralel'noyi roboty synchronnykh generatoriv [Influence of the time constant of the longitudinal excitation winding on the static stability of parallel operation of synchronous generators]. *Materialy VNTK studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh: Avtomatyka ta elektrotekhnika – Proceedings of the Student, Postgraduate, and Young Scientists Conference: Automation and Electrical Engineering*, 83–87. Mykolaiv. [in Ukrainian].
- [19] Shati A., Rahman L. (2019). Modeling and Simulation of a Synchronous Generator with Rotor Angle Stability and Solve Inter Area Mode of Oscillation in Power System using Power System Stabilizer(PSS). *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, 18(1), pp. 35–43.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Patel, M. R. (2012). *Shipboard electrical power systems (2nd ed.)*. CRC Press.
- [2] Слинько Г. І., Рябошапка Н. Є., Сухонос Р. Ф., Євсєєва Н. О., Солдатченков О. Г. (2024). Дослідження впливу пропусків запалювання на нерівномірність обертання бензинового двигуна. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка»*, 2024. Вип. 1. С. 82–88. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-1-11
- [3] В. С. Наливайко, Б. Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. (2015). *Суднові двигуни внутрішнього згорання*. Миколаїв : Торубара В. В., 332 с.

- [4] Sørensen, A. J., Hansen, J. F. (2015). *Designing the electric energy system of ships (2nd ed.)*. The Institute of Marine Engineering, Science & Technology (IMarEST).
- [5] Остапівський М. О., Юр'єва О. Ю. (2018). *Електричні машини і трансформатори*. Київ : Каравела, 452 с.
- [6] Islam, M. M. (2014). *Shipboard power systems design and verification fundamentals*. Wiley-IEEE.
- [7] Xu, G., Hu, Y., Hao, X., Zhan, Y., Zhao, H., Liu, X., & Luo, Y. (2018). The relationship of magnetomotive force under different excitation modes of dual-excited synchronous generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 8200704. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2763163.
- [8] Подимака В. І., Новогорецький С. М. (2013). *Математичне моделювання перехідних процесів в електроенергетичній системі. Навчальний посібник*. Миколаїв : НУК, 76 с.
- [9] Зенович О., Василенко Р., Георгієв Ю., Ейдульштейн Г., Паянок О. (2024). Віртуальна модель безконтактного генератора змінного струму. *Вісник Хмельницького національного університету*, вип. 6 (Т. 1), С. 434–439.
- [10] MathWorks (2026). Matlab: Simulink Simscape Electrical: User's Guide. <https://www.mathworks.com/help/sps/index.html>
- [11] Куцик А.С., Пінчук Ю.М., Ліщук А.С. (2024). Математична модель багатообмоткової синхронної машини з гібридним збудженням. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи», вип. 1(7). С. 62–71. DOI: 10.23939/sepes 2024.01.062
- [12] Agarala, A., Bhat, S. S., Zychma, D., Sowa, P. (2024) A novel approach to using dual-field excited synchronous generators as wind power generators. *Energies*, 17, 456. DOI: 10.3390/en17020456
- [13] Crescent Onyebuchi Omeje, Stephen Ejiofor Oti (2022) Dynamic Analysis of Synchronous Machine at Varied Excitation Voltage and Quadrature axis Reactance. *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering*, Vol. 10, Issue 2, pp. 16–29.
- [14] C. O. Onah, and J. Reuben (2016) Dynamic Modeling and Simulation of Salient Pole Synchronous Motor Using Embedded Matlab. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. Vol. 5, Issue 12, pp. 318–325.
- [15] Ломакін В. О. (2018) Зменшення нерівномірності ходу двигуна внутрішнього згорання удосконаленням конструкції маховика. *Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 Двигуни та енергетичні установки. На правах рукопису*. Київ : НТУУ, 21 с.
- [16] Mobarra, M., Rezkallah, M., Ilinca, A. (2022). Variable speed diesel generators: Performance and characteristic comparison. *Energies* 15, 592. DOI: 10.3390/en15020592
- [17] Новогорецький С. М. (2010). *Регулювання збудження синхронного генератора у поперечній осі для підвищення стійкості роботи суднової електростанції*. Дисертація кандидата технічних наук. Національний університет «Одеська політехніка».
- [18] Новогорецький С. М., Костюченко В. І., Баришник Ю. М. (2025). Вплив сталої часу поздовжньої обмотки збудження на статичну стійкість паралельної роботи синхронних генераторів. *Матеріали ВНТК студентів, аспірантів та молодих вчених: Автоматика та електротехніка*. Миколаїв : ННІАУ, НУК, С. 83–87.
- [19] Shati A., Rahman L. (2019). Modeling and Simulation of a Synchronous Generator with Rotor Angle Stability and Solve Inter Area Mode of Oscillation in Power System using Power System Stabilizer(PSS). *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, 18(1), pp.35–43. DOI:10.53799/ajse.v18i1.20

© Новогорецький С. М., Баришник Ю. М.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)