

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-48>

УДК 7.064.5:621.31(075.8)

ЗЕНОВИЧ ОЛЕКСАНДР

Харківський національний університет Повітряних Сил

<https://orcid.org/0000-0002-9982-2674>e-mail: aezenovich@gmail.com**БУРЧИН ЮРІЙ**

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0006-9211-660X>e-mail: burchin.juri@gmail.com**ВАСИЛЕНКО РОМАН**

Харківський національний університет Повітряних Сил

<https://orcid.org/0000-0001-7683-7526>e-mail: spike75.ru@gmail.com**ГЕОРГІЄВ ЮРІЙ**

Харківський національний університет Повітряних Сил

<https://orcid.org/0009-0004-7189-3966>e-mail: yura.georgiev.74@ukr.net**ПАЯНОК ОЛЕКСАНДР**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8139-4600>e-mail: opayanok@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ БЕЗКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗМІННОГО СТРУМУ НА ВІРТУАЛЬНІЙ МОДЕЛІ

В роботі представлені результати досліджень синхронного генератора як об'єкта діагностування на віртуальній моделі, побудованій в середовищі імітаційного моделювання MatLab/Simulink з урахуванням конструктивних особливостей каскадних синхронних генераторів серії ГТ: наявності у складі машини трьох генераторів – магнітоелектричного підбудника, електромагнітного збудника, електромагнітного основного генератора; некерованого трифазного обертового випрямляча; фазоімпульсного регулятора напруги з керованим випрямлячем. Проведені дослідження роботи генератора дали можливість отримати спектри вихідної напруги генератора в різних режимах у справному стані та у випадку виникнення типових відмов електронної частини генератора. Отримані результати моделювання показують принципову можливість ідентифікації типових відмов за спектрами вихідної напруги генератора.

Ключові слова: синхронний генератор, віртуальна модель, спектральний аналіз, середовище імітаційного моделювання MatLab/Simulink, регулятор напруги, трифазний випрямляч.

ZENOVYCH OLEKSANDR, VASYLENKO ROMAN, HEORGIEV YURIY

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University

BURCHYN YURIY

Kharkiv National University of Radio Electronics

PAYANOK OLEKSANDR

Vinnytsia National Technical University

STUDY OF THE OUTPUT VOLTAGE SPECTRUM OF A CONTACTLESS AC GENERATOR ON A VIRTUAL MODEL

At present, the control of the aircraft power supply system is carried out by the voltage level in the on-board network at a given load. When conducting in-depth control, for example, using automated control systems, the parameters of transient and steady processes (overshoot, regulation time, static error, etc.) are measured and evaluated using a parameter analyzer on the principle of "suitable - unsuitable", and the analysis results are issued in the automated control system in the form of generalized information about the state of the generation channel.

The disadvantage of the considered control method is the need to use additional devices in each controlled unit, which in some cases are not inferior in complexity to the control object. Therefore, the most rational solution to the problems of automatic control of the state of the power supply system in the complex of all aircraft equipment is the use of on-board automated control systems based on digital computers. Such automated control systems should provide continuous monitoring of operability in flight, and during operational types of aircraft preparation for flights and after flight - monitoring with fault finding up to the variable block.

When using microprocessor computing devices in promising power supply systems, which are assigned the functions of regulation, protection, control and control, along with diagnostics, the task of predicting the technical condition of the system can be solved, which will allow moving to a more progressive method of operation, namely operation by condition.

That is why the paper presents the results of research on a synchronous generator as an object of diagnostics on a virtual model built in the MatLab/Simulink simulation environment taking into account the design features of cascade synchronous generators of the GT series: the presence of three generators in the machine - a magnetoelectric exciter, an electromagnetic exciter, an electromagnetic main generator; an uncontrolled three-phase rotating rectifier; a phase-pulse voltage regulator with a controlled rectifier.

The conducted studies of the generator operation made it possible to obtain the spectra of the generator output voltage in different modes in good condition and in the event of typical failures of the electronic part of the generator. The obtained modeling results show the principle possibility of identifying typical failures by the spectra of the generator output voltage. When diagnosing the generator, it is advisable to also monitor the spectral composition of the output voltage of the voltage regulator, which will allow a more reliable assessment of the state of the electric machine. At the same time, it is important to take into account the influence of the generator operating mode on the spectra of the generator output voltage and voltage regulator.

The results of the research can be useful in creating ground and onboard automated control systems for power supply systems on microprocessor computing devices.

Key words: synchronous generator, virtual model, spectral analysis, MatLab/Simulink simulation environment, voltage regulator, three-phase rectifier.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.03.2025

Прийнята до друку / Accepted 09.04.2025

Постановка проблеми

У теперішній час основними системами електропостачання повітряних суден є трифазні системи змінного струму постійної частоти з безконтактними синхронними генераторами у якості основних джерел електроенергії [7, 11].

Контроль технічного стану систем електропостачання є одним з основних видів робіт при їх технічній експлуатації [11] та здійснюється на всіх етапах підготовки літального апарату (ЛА) до польотів, в процесі виконання регламентних робіт, ремонту і т. д.

Згідно сучасних реалій контроль системи електропостачання здійснюється за рівнем напруги у бортовій мережі при заданому навантаженні. При проведенні поглибленого контролю, наприклад, за допомогою автоматизованих систем контролю (АСК), вимірюються параметри перехідного й сталого процесів (перерегулювання, час регулювання, статична помилка й т. п.) та оцінюються за допомогою аналізатора параметрів за принципом «придатний – не придатний», а результати аналізу формуються в АСК у вигляді узагальненої інформації про стан каналу генерування.

Недолік розглянутого способу контролю полягає в необхідності застосування в кожному контрольованому агрегаті додаткових пристроїв, які за складністю у ряді випадків не поступаються об'єкту контролю. Тому найбільш раціональним вирішенням завдань автоматичного контролю стану системи електропостачання в комплексі всього обладнання літака є застосування бортових АСК, виконаних на базі цифрових обчислювачів. Такі АСК повинні забезпечувати в польоті постійний контроль працездатності, а на оперативних видах підготовки літака до польотів і після польоту – контроль із пошуком несправності аж до змінного блока. При використанні в перспективних системах електропостачання мікропроцесорних обчислювальних пристроїв, на які покладають функції регулювання, захисту, керування й контролю, поряд з діагностуванням може бути вирішене й завдання прогнозування технічного стану системи, що дозволить перейти до більш прогресивного методу експлуатації – експлуатації за станом.

Для вирішення вище поставленого завдання необхідно удосконалювати існуючі методи діагностування.

Аналіз останніх джерел

Серед багатьох методів функціонального діагностування електричних машин [1,2,3,5,6,12], таких як вібраційна діагностика, вимірювання та аналіз магнітного потоку в зазорі машини та зовнішнього магнітного поля, тепловий метод, вимірювання та аналіз електричних параметрів (напруг, струмів та їх спектрів), найбільш прийнятним для застосування в авіації є останній. Цей метод не потребує встановлення великої кількості додаткових датчиків та може бути використаний у стендовій апаратурі та на борту.

Контроль електричних параметрів з наступним виконанням спеціального аналізу (у тому числі – спектрального) дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів машини. Будь-які збурення в роботі електричної та/або механічної частини електричної машини призводять до змін магнітного потоку в зазорі електричної машини, а значить до виникнення слабкої модуляції струму, що споживається (виробляється) електричною машиною.

Наявність у спектрі напруги або струму характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частини машини. При застосуванні методу спочатку отримують еталонний спектр, що відповідає нормальному технічному стану машини. Цей спектр можна отримати експериментально або шляхом моделювання. При появі нових складових у спектрі приймають рішення про наявність тієї чи іншої несправності.

Аналіз публікацій за темою показує, що основна увага приділяється впливу на спектр напруги і струму статора типових несправностей генераторів, таких як несправність обмотки статора або її ізоляції, несправність обмотки ротора або її ізоляції, несправність підшипників, порушення механічної цілісності ротора, порушення механічної цілісності статора. Впливу відмов електронної частини каскадних генераторів (керованого напівпровідникового випрямляча у складі регулятора напруги і некерованого обертового випрямляча) на спектр вихідної напруги увага не приділяється. Саме тому в роботі розглядається саме вплив електронної частини на спектр вихідної напруги РН та генератора.

Метою роботи є: дослідження спектру вихідної напруги безконтактного синхронного генератора на віртуальній моделі у середовищі Matlab / Simulink в нормальному режимі роботи та при виникненні типових відмов електронних елементів генератора.

Виклад основного матеріалу

Базовою для систем електропостачання змінного струму стабільної частоти на літаках і вертольотах у теперішній час є конструктивна схема генератора типу ГТ, які використовуються з приводом постійної частоти обертання [11].

Генератор типу ГТ являє собою каскадну систему (рис. 1), що складається з трьох електричних машин: основного синхронного генератора Г з якорем на статорі і обертовим індуктором класичного типу; синхронного збудника З з якорем, що обертається, і полюсами, розташованими на статорі; трифазного магнітоелектричного підзбудника ПЗ зі збудженням від постійних магнітів і якорем на статорі. Ротори всіх трьох машин знаходяться на одному валу.

Для дослідження безконтактного синхронного генератора як об'єкту діагностування у середовищі Matlab [4, 9] була створена Simulink-модель.

Дослідження впливу режиму роботи генератора на спектральний склад вихідної напруги регулятора та генератора. Під час роботи генератора РН підтримує постійність вихідної напруги шляхом зміни напруги збудження підзбудника. Зміна напруги збудження здійснюється шляхом зміни кута керування α тиристорами несиметричного керуваного випрямляча [8,10]. Кут α відраховується відносно моментів природного відпирання. Кут керування змінюється у широких межах. Наприклад, на холостому ході $\alpha \approx 5\pi/6$, при номінальному навантаженні $\alpha \approx \pi/3$, при перевантаженні 30% $\alpha \approx 0$. Від кута α залежать форма випрямленої напруги.

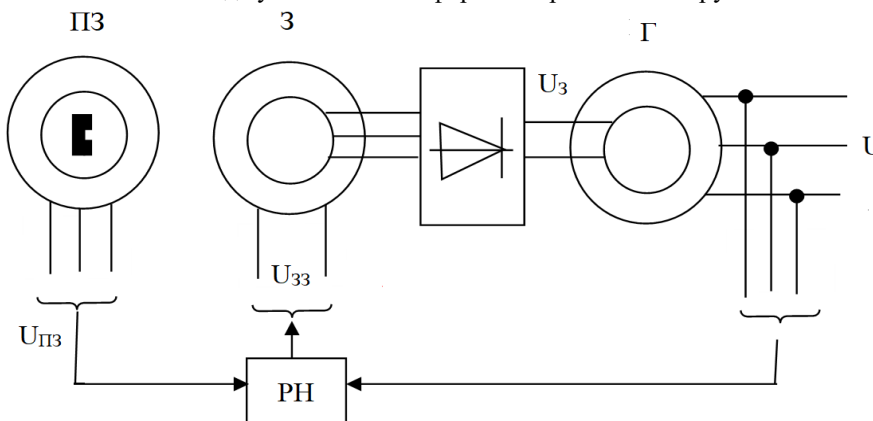


Рис. 1. Безконтактний синхронний генератор типу ГТ

На рис.2 приведена крива випрямленої напруги для різних α при діючій лінійній напрузі підзбудника 36 В і частоті 800 Гц.

При $\alpha=0$ і ідеальній роботі випрямляча без урахування явища комутації миттєве значення випрямленої напруги $u_e(\omega t)$ на відрізку $[-\pi/6, \pi/6]$ визначається виразом:

$$u_b(\omega t) = U_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

де $\omega t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$, $f=800$ Гц – частота напруги підзбудника.

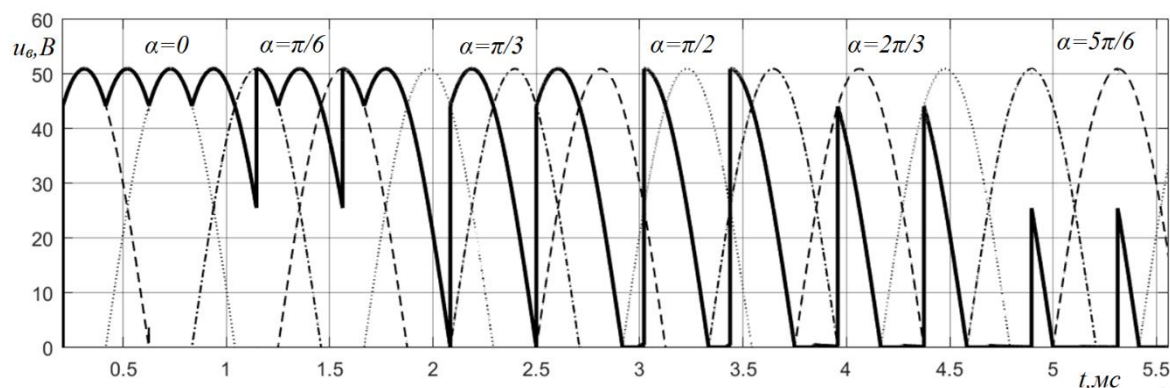


Рис. 2. Крива випрямленої напруги при різних кутах керування

Дану функцію можна розкласти у ряд Фур'є:

$$u_e(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_F t) + b_n \sin(n\omega_F t)] \quad (2)$$

де $a_n = \frac{2}{\lambda_n} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} u_e(\omega t) \cos(n\omega_F t) d\omega t$, $b_n = \frac{2}{\lambda_n} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} u_e(\omega t) \sin(n\omega_F t) d\omega t$, $n=0,1,2,\dots$ – коефіцієнти розкладання у ряд Фур'є, $\lambda_n = \pi/3$ – період пульсацій, $\omega_F = 6\omega$ – фундаментальна кругова частота.

За коефіцієнтами розкладання розраховуються модулі $|H_n|$ та фази ϕ_n гармонійних складових сигналу:

$$\begin{cases} |H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \\ \phi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}. \end{cases} \quad (3)$$

При $0 < \alpha < \pi/3$ і ідеальній роботі випрямляча без урахування явища комутації миттєве значення випрямленої напруги $u_e(\omega t)$ на відрізку $[-\frac{\pi}{6} + \alpha, \frac{\pi}{2} + \alpha]$ являє собою безперервну функцію і визначається виразом:

$$u_e(\omega t) = \begin{cases} U_m \cos(\omega t), & \text{якщо } -\frac{\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{6}, \\ U_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right), & \text{якщо } \frac{\pi}{6} < \omega t < \frac{\pi}{2} + \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Період пульсацій при цьому становить $\lambda_n = 2\pi/3$, а фундаментальна кругова частота $\omega_F = 3\omega$.

При $\pi/3 < \alpha < \pi$ миттєве значення випрямленої напруги $u_e(\omega t)$ на відрізку $[2\pi/3]$ являє собою перервну функцію і визначається виразом:

$$u_e(\omega t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } 0 < \omega t < -\frac{\pi}{3} + \alpha, \\ U_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right), & \text{якщо } -\frac{\pi}{3} + \alpha < \omega t < \frac{2\pi}{3}. \end{cases} \quad (5)$$

Період пульсацій при цьому становить $\lambda_n = 2\pi/3$, фундаментальна кругова частота $\omega_F = 3\omega$.

На рис.3 зображені спектри випрямленої напруги при різних кутах керування. При $\alpha = 0$ спостерігається максимальне значення постійної складової напруги. У спектрі присутні гармоніки з частотами 4,8 кГц і 9,6 кГц.

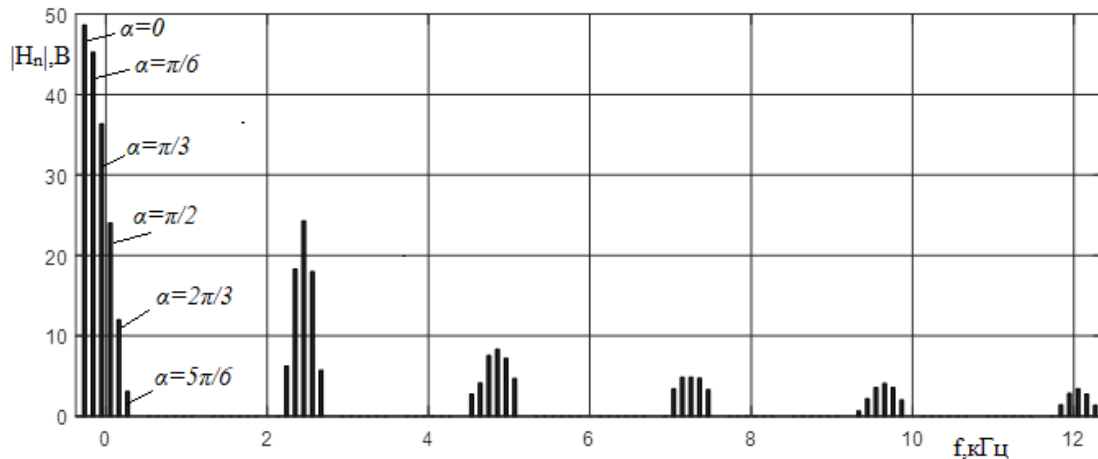


Рис. 3. Спектри випрямленої напруги при різних кутах керування

При $\alpha > 0$ з'являються гармонійні складові на частотах, кратних 2,4 кГц, та зі зростанням α зменшується постійна складова. Слід звернути увагу на гармонійні складові на частоті 2,4 кГц, тому що вони найбільш впливають на вихідну напругу генератора. Найбільше абсолютне значення амплітуди цієї гармоніки спостерігається при $\alpha = \pi/2$, а найбільше відносне (відносно постійної складової) – при $\alpha = 5\pi/6$.

Розраховані спектри далі будуть розглядатися як еталонні для оцінки впливу різних факторів на вихідну напругу РН.

Криві випрямленої напруги та спектри отримані без урахування впливу індуктивностей розсіяння обмоток підбудника та індуктивностей навантаження РН за умови, що вентиля у момент комутації переходять з відкритого стану в закритий миттєво. За наявності індуктивностей струм у колі навантаження і діодів миттєво змінитися не може, а змінюється протягом деякого часу (кута комутації), коли струм однієї фази збільшується, а другої – зменшується.

Шляхом моделювання були отримані криві випрямленої напруги та відповідні спектри при різних кутах керування з урахуванням індуктивностей розсіяння обмоток підбудника та індуктивності навантаження РН. На рис.4 зображена крива випрямленої напруги при різних кутах керування.

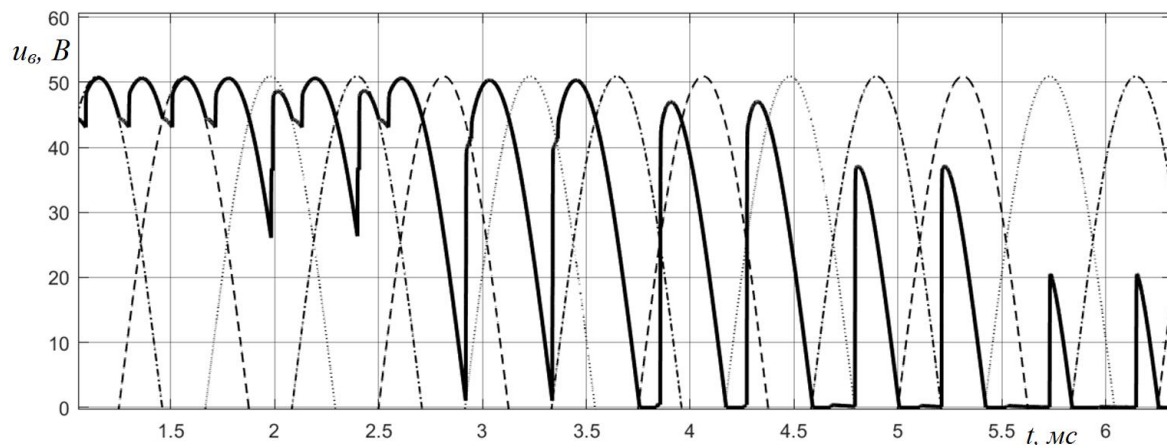


Рис. 4. Крива випрямленої напруги при різних кутах керування з урахуванням комутації

На рис. 5 приведені різницеві спектри, отримані як різниця амплітуд гармонік $|H_n^*|$ з урахуванням комутації та амплітуд $|H_n|$, які відповідають ідеальній роботі: $\Delta = |H_n^*| - |H_n|$.

Як бачимо, явище комутації призводить до зменшення постійної складової при усіх кутах керування. При $\alpha = 0$ збільшуються амплітуди гармонік з частотами 4,8 кГц і 9,6 кГц. При $\alpha > 0$ амплітуди усіх гармонік зменшуються (за винятком при $\alpha = \pi/6$ амплітуда на частоті 2,4 кГц дещо збільшується).

Зменшення постійної складової призводить до зменшення вихідної напруги генератора. Вплив гармонійних складових на вихідну напругу дещо зменшується. Обмотки збудження збудника і генератора живляться випрямленою напругою підбудника і збудника відповідною. У нормальному режимі роботи пульсації випрямлячів призводять до появи вищих гармонік у складі вихідної напруги генератора. Так, наприклад, при куті комутації $\alpha = \pi/2$, при якому гармонійна складова на частоті 2,4 кГц найбільша, амплітуди вищих гармонік у складі вихідної напруги не перевищують 0,04 В.

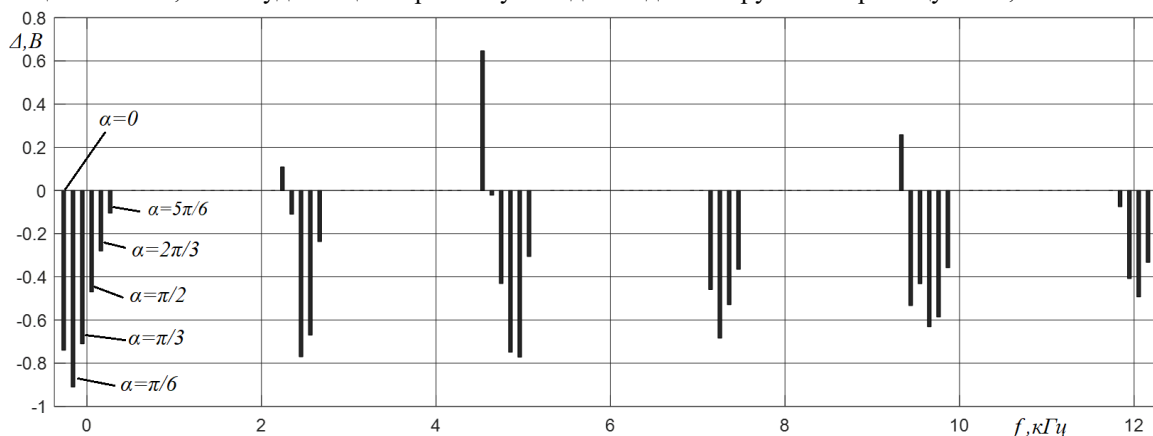


Рис. 5. Різницеві спектри напруги РН при урахуванні комутації

На рис.6 показаний різницевий спектр вихідної напруги генератора для цього випадку. У якості еталонного був обраний спектр, отриманий при живленні збудника постійною напругою, рівною постійній складовій при куті комутації $\alpha = \pi/2$.

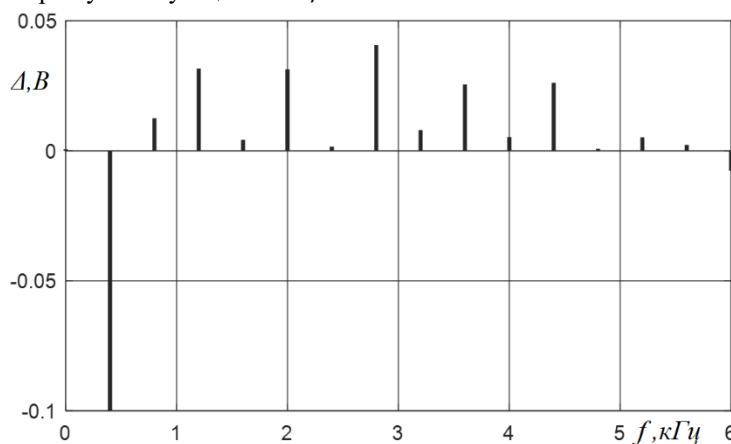


Рис. 6. Різницевий спектр вихідної напруги генератора при $\alpha = \pi/2$

Таким чином, пульсації випрямляча РН призводить до появи вищих гармонік у складі вихідної напруги генератора, але амплітуди цих гармонік незначні і не виходять за межі встановлених норм.

Дослідження впливу типових несправностей генераторів змінного струму на спектр вихідної напруги генератора. У разі появи несправностей у випрямлячах і колах їх живлення пульсації напруги збільшуються, що призводить до зміни гармонійного складу як вихідної напруги генератора, так і вихідної напруги РН.

За допомогою запропонованої моделі були отримані спектри вихідної напруги генератора для нормальної роботи та при типових відмовах: при обриві фази обмотки збудника; при обриві діода збудника; при КЗ діода збудника; при обриві діода РН; при КЗ діода РН; при обриві фази підбудника.

Різницеві спектри вихідної напруги генератора при номінальному навантаженні, що представляють собою результат вирахування з поточного спектра напруги еталонного спектру (за винятком першої гармоніки) для несправностей збудника, приведені на рис.7.

Розглянуті відмови збудника призводять до значного зниження напруги генератора (амплітуди першої гармоніки) внаслідок зменшення постійної складової вихідної напруги обертового випрямляча. При замкненому зворотному зв'язку і номінальному навантаженні РН зменшує кут керування до $\alpha = 0$.

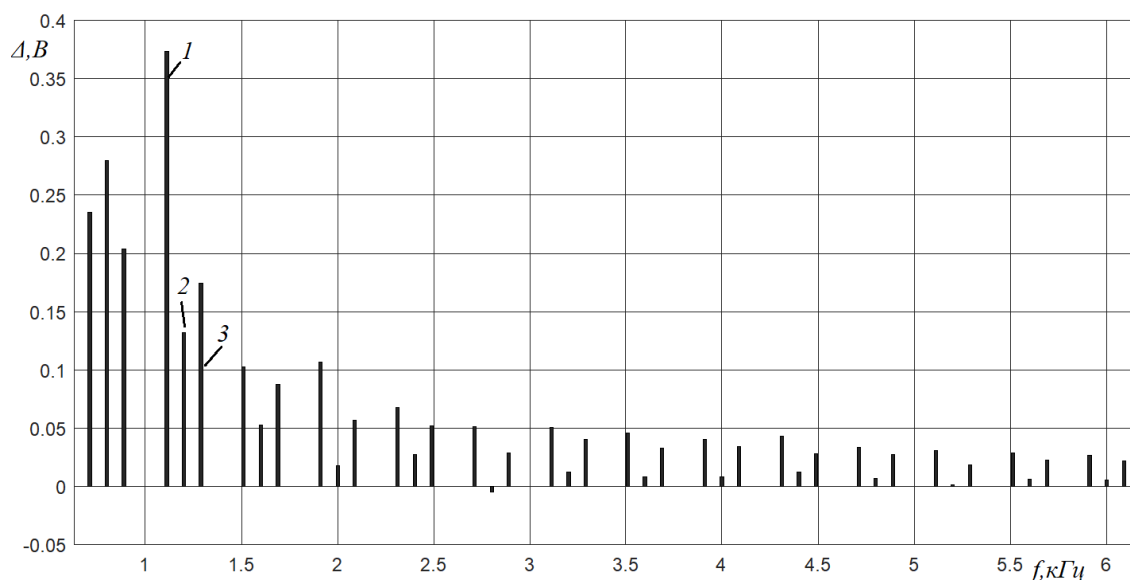


Рис. 7. Різницеві спектри вихідної напруги генератора: 1- при обриві фази обмотки збудника, 2- при обриві діода збудника, 3- при КЗ діода збудника

Амплітуди вищих гармонійних складових також суттєво змінюються, при цьому кожній відмові відповідає свій спектр. Цей факт можна використати при діагностуванні генератора. При малих навантаженнях РН відновлює задану напругу, не зменшуючи кут керування до нуля, і це потрібно враховувати для отримання коректних результатів (рис.8).

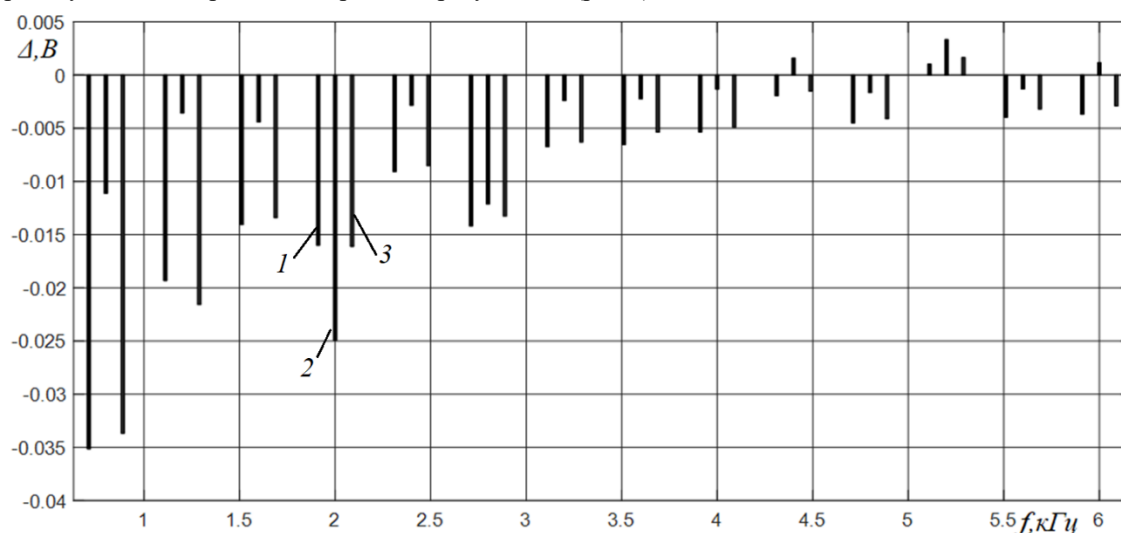


Рис. 8. Різницеві спектри вихідної напруги генератора: 1- при обриві фази обмотки підзбудника, 2- при обриві діода підзбудника, 3- при КЗ діода підзбудника

Відмови підзбудника і РН також призводять до значного зниження напруги генератора внаслідок зменшення напруги збудження збудника, але зміни амплітуд вищих гармонік на порядок нижче, ніж при відмовах збудника і обертового випрямляча.

Таким чином, усі наведені несправності призводять до зниження напруги нижче припустимого рівня, та впливають на спектр вихідної напруги генератора. Цей факт можна використати при проведенні контролю генератора. Зауважимо, що при відмовах у колах підзбудника і регулятора напруги амплітуди вищих гармонік у складі вихідної напруги невеликі. Для підвищення достовірності контролю пропонується також вимірювати спектр вихідної напруги регулятора. За допомогою запропонованої моделі були отримані спектри вихідної напруги РН для нормальної роботи та при типових відмовах :

- при обриві фази підзбудника,
- при обриві діода РН,
- при КЗ діода РН.

Різницеві спектри вихідної напруги РН при таких відмовах для різних кутів керування зображені на рис.9- рис.11.

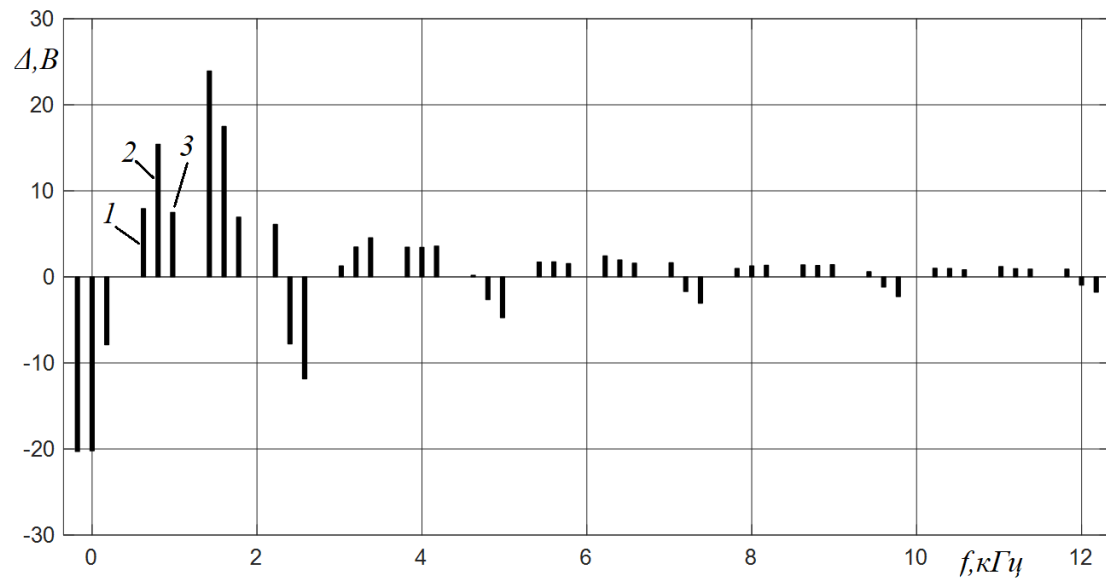


Рис. 9. Різницеві спектри вихідної напруги РН при обриві фази під збудника для кутів керування : 1- $\alpha=0$, 2 - $\alpha=\pi/3$, 3- $\alpha=2\pi/3$

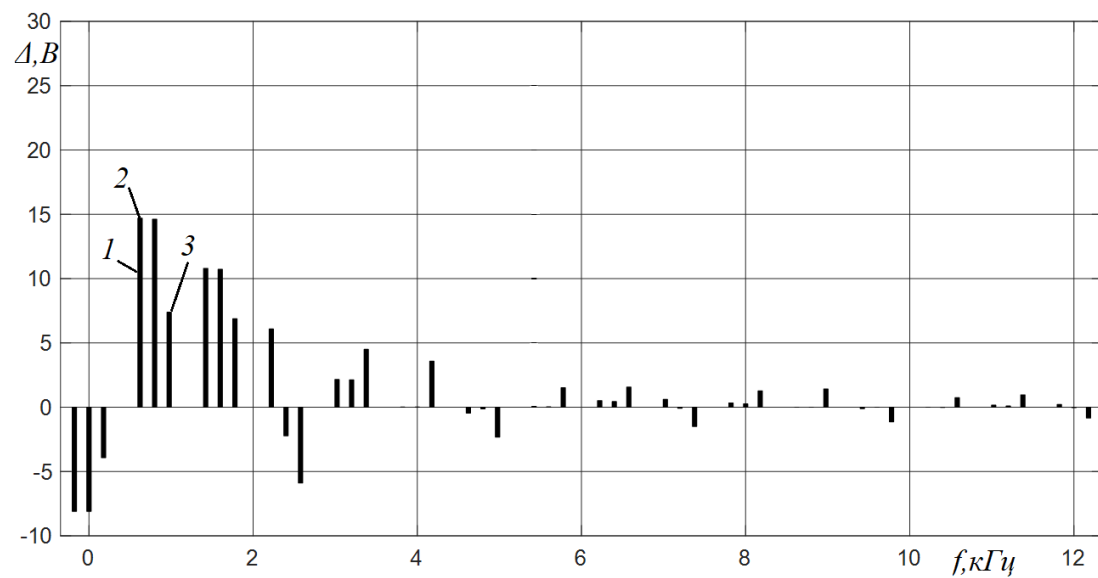


Рис. 10. Різницеві спектри вихідної напруги РН при обриві діода РН для кутів керування : 1- $\alpha=0$, 2 - $\alpha=\pi/3$, 3- $\alpha=2\pi/3$

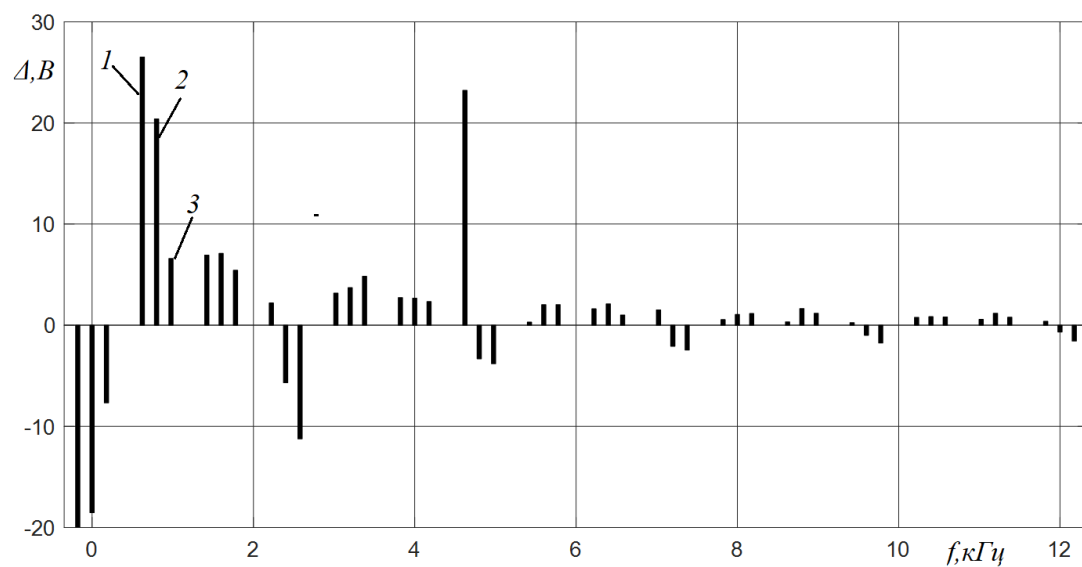


Рис. 11. Різницеві спектри вихідної напруги РН при КЗ діода РН для кутів керування: 1- $\alpha=0$, 2 - $\alpha=\pi/3$, 3- $\alpha=2\pi/3$

З приведених досліджень можна зробити висновок, що при відмовах у колах підзбудника і регулятора напруги зміни у спектрі напруги РН є більш значимими, ніж у спектрі вихідної напруги. При цьому кожній відмові відповідає свій спектр, що дає можливість ідентифікувати відмову.

Вважаючи на те, що зміни амплітуд гармонік при появі відмов співрозмірні зі змінами амплітуд при різних кутах керування (рис.3), дуже важливо враховувати кут керування при обранні еталонного спектру для порівняння. При проведенні діагностування на стенді при розімкненому зворотному зв'язку за напругою можна задавати тестові стимулюючі сигнали, які відповідають певним кутам керування. При діагностуванні на борту потрібно передбачити вимірювання кута керування.

Таким чином, наведені результати дослідження показують, що при проведенні діагностики генератора доцільно крім рівня напруги контролювати також спектральний склад вихідної напруги генератора та регулятора напруги, що дозволить більш достовірно оцінити стан електричної машини. Звичайно, це потребує застосування сучасних засобів контролю з використанням обчислювальної техніки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Найбільш прийнятним методом діагностики стану авіаційних синхронних генераторів є метод, заснований на контролі вихідної напруги генератора та регулятора напруги з подальшим виконанням спектрального аналізу отриманих сигналів. Для застосування цього методу необхідно мати еталонні спектри, які можна отримати експериментально, або шляхом моделювання.

Встановлено, що при проведенні діагностики генератора доцільно крім рівня напруги контролювати також спектральний склад напруги генератора та регулятора напруги, що дозволить більш достовірно оцінити стан системи електропостачання. Результати досліджень можуть бути корисними при створенні наземних і бортових автоматизованих систем контролю на мікропроцесорних обчислювальних пристроях, що дозволить поряд з діагностуванням вирішити й завдання прогнозування технічного стану системи, та перейти до більш прогресивного методу експлуатації, а саме експлуатації за станом.

Література

1. Salomon, C. P., Ferreira, C., Sant'Ana, W. C., Lambert-Torres, G., da Silva, L. E. B., Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. de L., & Torres, B. S. (2019). A study of fault diagnosis based on electrical signature analysis for synchronous generators predictive maintenance in bulk electric systems. *Energies*, 12(8), 1506. <https://doi.org/10.3390/en12081506>
2. Rubanenko, O., Gundebommu, S. L., Hunko, I., & Peroutka, Z. (2021). Analysis of development directions of online diagnostics of synchronous generator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97(4), 72–76. <https://doi.org/10.15199/48.2021.04.16>
3. Arumugam, D., Logamani, P., & Karuppiyah, S. (2018). Electromagnetic & thermal analysis of synchronous generator with different rotor structures for aircraft application. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1469–1478. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.025>
4. The MathWorks, Inc. (2018). *Matlab & Simulink Simscape Electrical: User's guide (Electronics, Mechatronics, and Power Systems)*. The MathWorks, Inc.
5. Mostafaei, M., & Faiz, J. (2021). An overview of various faults detection methods in synchronous generators. *IET Electric Power Applications*. <https://doi.org/10.1049/elp2.12031>
6. Lipus, J., Jankovych, R., Hammer, M., & Lipus, T. (2016). Vibration and related diagnostics of motors and generators. *MM Science Journal*, 2016(December), 1282–1287. <https://www.mmscience.eu/journal/issues/december-2016/articles/vibration-and-related-diagnostics-of-motors-and-generators>
7. Зенович, О. Є., Хлоп'ячий, В. А., Георгієв, Ю. В., та ін. (2022). *Авіаційні електричні машини: навч. посіб.* Харків: ХНУПС.
8. Сенько, В. І., Трубіцин, К. В., & Чибеліс, В. І. (2022). *Силова перетворювальна техніка: конспект лекцій (електронне мережне навчальне видання)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
9. Гераїмчук, М. Д., Лазарев, Ю. Ф., & Толочко, Т. О. (2006). *Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум*. Київ: НТУ.
10. Островерхов, М. Я., Сенько, В. І., & Чибеліс, В. І. (2021). *Промислова електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги у постійну: навчальний посібник*. Київ: Ліра-К.
11. Зенович, О. Є., Хлоп'ячий, В. А., Кривонос, В. М., та ін. (2021). *Системи електропостачання повітряних суден: навч. посіб.* Харків: ХНУПС.
12. Яцун, М. А., & Яцун, А. М. (2010). *Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів: навчальний посібник*. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка».

References

1. A Study of Fault Diagnosis Based on Electrical Signature Analysis for Synchronous Generators Predictive Maintenance in Bulk Electric Systems. Camila Paes Salomon, Claudio Ferreira, Wilson Cesar Sant'Ana, Germano Lambert-Torres, Luiz Eduardo Borges

- da Silva, Erik Leandro Bonaldi, Levy Ely de Lacerda de Oliveira , Bruno Silva Torres. *Energies* 2019, 12, 1506. <https://www.mdpi.com/journal/energies> and Power Systems). The MathWorks, Inc., 2018.
2. Analysis of Development Directions of Online Diagnostics of Synchronous Generator. Olena Rubanenko, Sree Lakshmi Gundebommu , Iryna Hunko, Zdenek Peroutka. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 4/2021.
 3. Electromagnetic & thermal analysis of synchronous generator with different rotor structures for aircraft application. Deepak Arumugam, Premalatha Logamani , Santha Karupiah . *Alexandria Engineering Journal*. Volume 57, Issue 3, September 2018.
 4. Matlab & Simulink Simscape Electrical: User's Guide (Electronics, Mechatronics,
 5. Mostafaei M, Faiz J. An overview of various faults detection methods in synchronous generators. *IET Electr.Power Appl.* 2021. <https://doi.org/10.1049/elp2.12031>
 6. Vibration and related diagnostics of motors and generators. Jan Lipus, Robert Jankovych ,Milos Hammer, Tadeas Lipus. *MM SCIENCE JOURNAL* ,2016 , December.
 7. Aviatyini elektrychni mashyny : navch. posib. / O. Ye. Zienovych, V. A. Khlop'iachyi, Yu.V. Heorhiiev ta in. – Kh. : KhNUPS, 2022.
 8. V.I. Senko, K.V. Trubitsyn, V.I. Chybelis. Sylova peretvoriuvalna tekhnika . Konspekt lektsii : navchalnyi posibnyk (elektronne merezhne navchalne vydannia) . – Kyiv :KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022.
 9. M.D. Heraimchuk, Yu.F. Lazarev, T.O. Tolochko. Modeliuvannia system u seredovyschi MATLAB-SIMULINK: Kompiuternyi praktykum. – K.:NTU, 2006.
 10. Ostroverkhov M.Ia., Senko V.I., Chybelis V.I. Promyslova elektronika. Napivprovodnykovi peretvoriuvachi zminnoi napruhy u postiinu: Navchalnyi posibnyk. – Kyiv: Lira-K, 2021.
 11. Systemy elektropostachannia povitrianykh suden : navch. posib. / O. Ye. Zienovych, V. A. Khlopiachyi, V. M. Kryvonos ta in. – Kh. : KhNUPS, 2021.
 12. Iatsun M. A., Yatsun A. M. Ekspluatatsiia ta diahnostuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ: navchalnyi posibnyk. — Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika», 2010.