

## **АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ І КОМБІНОВАНИМ З'ЄДНАННЯМ ФАЗ МОДУЛЯТОРА ПІД ЧАС РОБОТИ НА ВУЗОЛ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

*К.М. Василів, доктор технічних наук  
Львівський національний аграрний університет*

*Методом математичного експерименту виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним модульованим збуджувачем. Проведено аналіз процесів на предмет роботопридатності системи живлення під час її роботи на вузол асинхронних двигунів. Встановлено закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів залежно від параметрів системи керування комутатором.*

***Асинхронізований генератор, безконтактний модульований збуджувач, комутатор, асинхронний двигун, електромагнітні процеси, електромеханічні процеси.***

Аналіз літератури показує, що автономна енергетика становить вагомий сектор генерування і споживання електроенергії. Тому, увага до автономних систем електроживлення є не лише виправданою, але й закономірною. Характерною особливістю автономних джерел електроживлення є змінна частота обертання ротора генератора, що істотно ускладнює проблему забезпечення постійної частоти напруги за умов змінної швидкості рушія. В цьому контексті заслуговує на увагу ідея розробки автономних систем електроживлення (АСЕЖ) на базі асинхронізованих генераторів з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) [4]. Вагомі теоретичні результати і досвід роботи в цьому напрямку дає підстави стверджувати, що такі системи електроживлення належать до перспективних, або характеризуються високим рівнем надійності в роботі і високим рівнем стабілізування частоти напруги генератора за умов змінної швидкості обертання рушія.

На сьогодні вже виконана принципово важлива робота, пов'язана з розробкою концепції систем електроживлення на базі АСГ з БКМЗ. Так, у [4] започатковано теоретичні засади генераторів стабільної частоти на базі АСГ з БКМЗ. Доведено, що стабілізування частоти напруги генератора на підставі явища модуляції напруги безконтактного збуджувача дає змогу отримати ідеальну якість напруги за критерієм гармонічного спектра напруги генератора завдяки живленню обмотки збудження струмом частоти ковзання, що в таких системах забезпечує стабільну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора. Очевидним є те, що на підставі лише теоретичних засад принципово неможливо отримати достатньої з погляду практичних

потреб інформації стосовно перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Тому, в цьому напрямку ведеться інтенсивна робота і на сьогодні виконано великий обсяг робіт з розробки методів, математичних моделей та на їх підставі алгоритмів і програмних комплексів, які за допомогою сучасних інформаційних технологій дають змогу проводити всебічні дослідження з метою оптимізування параметрів структурних компонентів таких СЕЖ [1–3].

Електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в таких системах електроживлення належать до особливо складних з погляду характеру визначальних координат та їх функціональних взаємозв'язків, а тому ще не до кінця вивченими. Результати досліджень, які стосуються вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів та їх впливу на функціонування АСЕЖ на базі АСГ з безконтактним трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем (за схемою генератора в одну зірку і модулятора з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора) під час роботи генератора на вузол асинхронних двигунів і становлять предмет цієї статті.

Результати досліджень, які тут подаються, ґрунтуються на результатах попередніх досліджень, які тісно пов'язані як з розробкою методів і математичних моделей АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ [1, 2], так і (певною мірою) з результатами, отриманими з безпосереднього аналізу процесів, які відбуваються в цій же системі електроживлення під час її роботи і на активно-індуктивне живлення [3].

З теорії систем генерування на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ [4] відомо, що ці системи можуть формуватися за низкою сімейств схем силового електричного кола (як самого генератора, так і модулятора та комутатора), які мають визначальний вплив на характер перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Очевидним також є те, що на перебіг процесів впливає вид навантаження (тобто тип споживачів) та їх режими роботи. Тому, завдання дослідження таких систем загалом полягає у вивченні закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів для кожної з можливих схем силового електричного кола (модулятора, генератора і комутатора), а також для кожного з видів споживачів електроенергії їх параметрів та режимів роботи. У [3] показано, що схема силового електричного кола модулятора має істотний вплив на перебіг процесів, а значить на функціональні можливості системи генерування загалом. Результати досліджень, отримані в цій публікації вказують на те, що більш стійку роботу систем під час її роботи на активно-індуктивне навантаження забезпечує схема модулятора з комбінованим з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора.

Враховуючи те, що споживачами електроенергії в такій системі живлення можуть бути ще й асинхронні двигуни, цілком логічним є запитання: чи матимуть місце аналогічні тенденції (а, якщо так, то яким чином вони проявлятимуться) під час роботи цієї ж СЕЖ на вузол асинхронних двигунів. Тому, в цій статті ставиться за мету отримати науково обґрунтовану відповідь на поставлене вище запитання в контексті роботопридатності цієї ж системи

електроживлення за схемою модулятора з комбінованим з'єднанням фаз роторів машин модулятора під час роботи генератора на вузол асинхронних двигунів.

**Мета дослідження** – полягає в аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем з комбінованим з'єднанням фаз модулятора за схемою генератора в одну зірку під час роботи системи електроживлення на вузол асинхронних двигунів.

**Результати досліджень.** Отже, враховуючи те, що завданням дослідження є аналіз процесів СЕЖ на базі АСГ з трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою модулятора з комбінованим з'єднанням фаз роторів машин модулятора, схема силового електричного кола піддослідної системи електроживлення має вигляд, зображений на рисунку 1. З цього рисунку видно, що структурними елементами схеми слугують: дві асинхронні машини АМ1 та АМ2; два джерела живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої з'єднані в зірку. До системи електроживлення також входять три споживачі (асинхронні двигуни): АД1, АД2, АД3. Ключі  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  призначені для вмикання та відмикання асинхронних двигунів.

Решта позначень на схемі рис.1 мають такий зміст. Літерами  $\varphi$ ,  $i$ ,  $E$  позначено: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами  $F$ ,  $G$ ,  $D$  в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та асинхронних двигунів. Літерами  $S$ ,  $R$  в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначені номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 в нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2, а також до асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3.

Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора та машин модулятора.

Дослідження автономній системі електроживлення проведемо для АСГ потужністю 100 кВт. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та виконується розгін ротора генератора. При досягненні швидкості обертання ротора близької до синхронної вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи виконується почергове вмикання трьох асинхронних двигунів: АД1, АД2, АД3, а на останньому етапі виконується почергове відімкнення двигунів у зворотній послідовності.

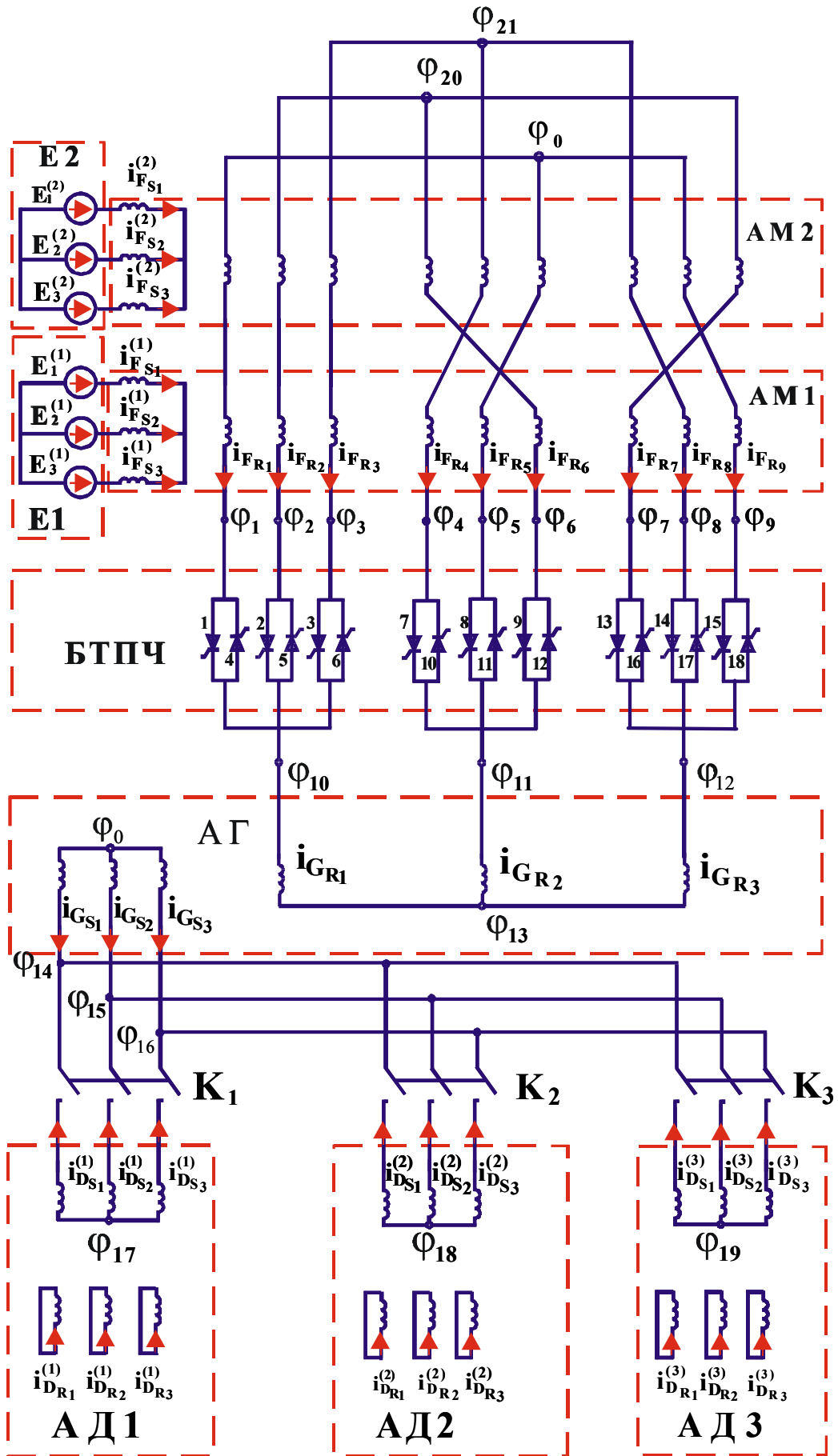


Рис. 1. Схема силового электрического кола АСЕЖ.

Для моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в піддослідній системі електроживлення для заданого режиму робочого циклу споживачами підібрані три асинхронні двигуни потужністю по 8 кВт.

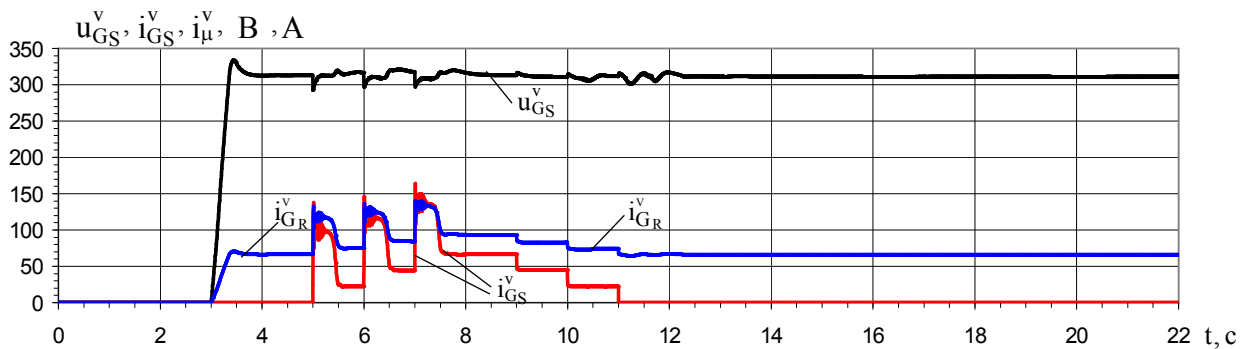
Про якість електроенергії за найважливішими критеріями її оцінки (до яких окрім частоти віднесемо стабільність амплітуди напруги генератора), а також про роботопридатність системи генерування цього класу загалом можна робити висновок на підставі аналізу характеру розрахункових залежностей таких інтегральних координат як модулі зображувальних векторів (амплітуд) фазних напруг і струмів статора та модуля зображувального вектора струмів фаз ротора генератора  $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ . Тому, аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів розпочнемо саме з розгляду цих важливих координат.

За результатами моделювання побудовані розрахункові залежності зазначених вище координат  $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ , які зображені на рис. 2. Характер кривих цих координат відображає повний робочий цикл АСЕЖ за окремими його етапами. На першому етапі (за час від  $t=0$  до  $t=3$  секунди) рушій розкручує ротор генератора до синхронної швидкості. В момент часу  $t=3$  сек. вмикається збудження. Тому, на наступному відтинку спостерігається поява і зростання струму збудження (струму в обмотках ротора генератора) і, як наслідок, поява та зростання напруги статора генератора. Генератор працює в режимі неробочого ходу на проміжку часу від  $t=3$  до  $t=5$  секунд. До моменту часу  $t=5$  секунд амплітуди фазних напруг досягли заданого значення, яке дорівнює 311 Вольт. Починаючи з моменту часу  $t=5$  секунд, щосекунди вмикаються асинхронні двигуни в такій послідовності: АД1, АД2, АД3. На проміжку часу від  $t=7$  до  $t=9$  секунд генератор працює на всі три споживачі. А, починаючи з  $t=9$ , двигуни відмикаються у зворотній до увімкнення послідовності: АД3, АД2, АД1.

З форми кривої модуля зображувального вектора фазної напруги статора генератора видно, що амплітуда напруги є стабільною, а в області перехідних процесів, спричинених увімкненням та відмиканням асинхронних двигунів, перебуває в допустимих стандартами межах відхилення від заданого значення. З рис. 2 також видно, що система автоматичного керування виконує свою функцію стабілізування амплітуди напруги статора генератора, а інші координати (струми та напруги) відображають поведінку системи в межах повного робочого циклу.

Вирішальну роль у забезпеченні необхідного характеру цих координат відіграє стійкість роботи комутатора. А це залежить від багатьох чинників, серед яких: параметри машин модулятора і генератора, параметри і алгоритм функціонування системи керування комутатором та системи автоматичного керування стабілізування визначених координат (тут амплітуди фазних напруг статора генератора), а також вид, параметри та режими роботи споживачів. Однозначно, що на стійкість роботи системи мають великий вплив схеми

сполучення фаз ротора генератора, а також схеми сполучення машин модулятора, що і є предметом аналізу процесів в цій праці.



**Рис. 2.**  $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{GR}^v$  – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора

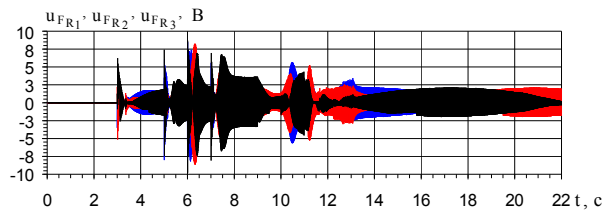
Важливу роль у функціонуванні системи збудження і АСЕЖ загалом відіграє перебіг електромагнітних процесів у модуляторі. Тому перейдемо до аналізу напруг та струмів модулятора. На рис. 3 зображено розрахункові залежності від часу миттєвих значень спадів напруг трьох трифазних груп фазних гілок роторів машин модулятора. Рис. 3а), 3б), 3в) ілюструють миттєві значення спадів електричних напруг  $u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$  на I, II, III;  $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$  на IV, V, VI, та  $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$  на VII, VIII, IX послідовно з'єднаних фазних гілках роторів машин модулятора. Аналогічним чином на рис. 4 зображені струми трьох трифазних групи фазних гілок роторів машин модулятора. Відповідно, на рис. 3б зображені розрахункові залежності струмів  $i_{FR1}, i_{FR2}, i_{FR3}$  – I, II, III; на рис. 3б струмів  $i_{FR4}, i_{FR5}, i_{FR6}$  – IV, V, VI та на рис. 3б) струмів  $i_{FR7}, i_{FR8}, i_{FR9}$  – VII, VIII, IX фазних гілок роторів машин модулятора.

Криві на рисунках 3 та 4 виразно відображають фізику процесів, внаслідок яких отримано електричні напруги та струми модульованої форми частоти ковзання. Як бачимо з рисунків 3 та 4, на проміжку часу, де ковзання дорівнює нулю ( $S=0$ ), спостерігаємо напруги і струми без модуляції частотою заповнення  $f_3=150$  Гц. Амплітуди напруг змінюються залежно від зміни електрорушійних сил джерел живлення, а це, своєю чергою, таким чином, щоб підтримувати потрібне значення струму збудження, адекватно реагуючи на величину навантаження генератора.

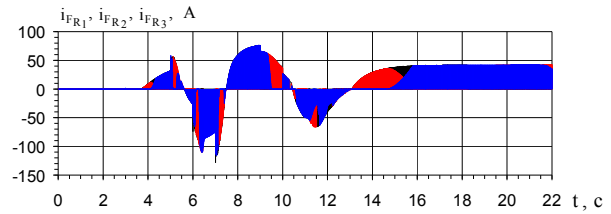
З рисунків 3, 4 видно, що модулятор, згідно з теоретичним передбаченнями виконує свою функцію – утворення напруг та струмів модульованої форми, необхідних для формування циклоконвертором трифазної системи струмів частотою ковзання.

Структурні елементи АСЕЖ перебувають у стані взаємного зв'язку. Тому, будь-які збурення в одному з них неминуче відповідно впливають на процеси в усіх інших. У випадку цього режиму джерелом таких збурень слугує

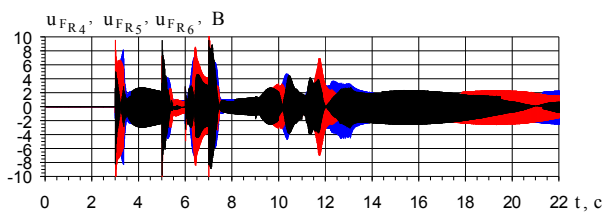
вмикання та відмикання асинхронних двигунів, що призводить до зміни швидкості обертання ротора генератора. Очевидно, що напруги та струми фазних гілок роторів машин модулятора також повинні реагувати на ці збурення.



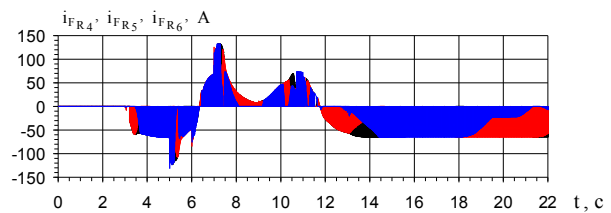
а)  $u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$  – миттєві напруги I, II, III фазних гілок роторів машин модулятора;



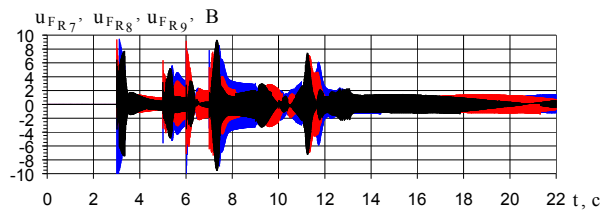
а)  $i_{FR1}, i_{FR2}, i_{FR3}$  – миттєві струми I, II, III фазних гілок роторів машин модулятора



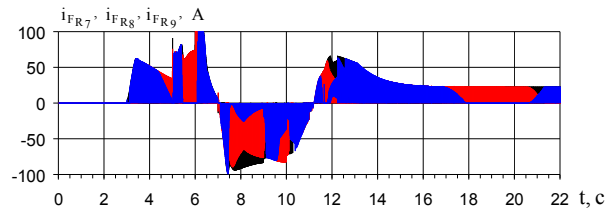
б)  $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$  – миттєві напруги IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора;



б)  $i_{FR4}, i_{FR5}, i_{FR6}$  – миттєві струми IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора



в)  $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$  – миттєві напруги VII, VIII, IX фазних гілок роторів модулятора;



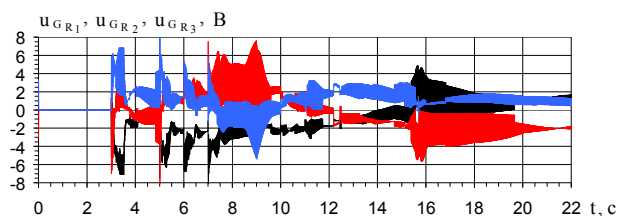
в)  $i_{FR7}, i_{FR8}, i_{FR9}$  – миттєві струми VII, VIII, IX фазних гілок роторів машин модулятора;

**Рис. 3. Залежності миттєвих напруг фазних гілок роторів машин модулятора**

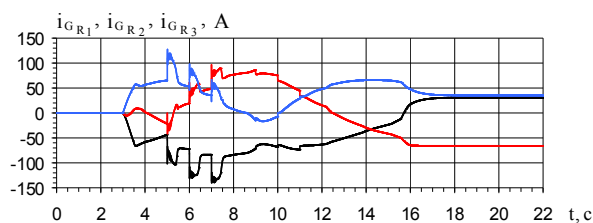
**Рис. 4. Залежності миттєвих струмів фазних гілок роторів машин модулятора**

Інформація про характер електричних струмів та напруг у обмотці ротора генератора має принципово важливе значення. Проаналізуємо розрахункові залежності фазних напруг та струмів ротора генератора, які зображені на рис. 5 та рис. 6, відповідно. З рис. 5 видно, що характер фазних напруг ротора генератора відображає закономірності електромагнітних процесів, які відбуваються в модуляторі. В наслідок роботи комутатора в обмотці ротора генератора формується трифазна система напруг частоти ковзання.

Характер кривих струмів ротора рис. 6 вказує на те, що безконтактна система збудження на базі каскадного модулятора дає змогу отримати струм збудження генератора частоти ковзання, що, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля генератора стосовно обмотки статора, а значить і постійну частоту напруги генератора не залежно від частоти обертання ротора генератора.



**Рис. 5.**  $u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$  – фазні напруги ротора генератора



**Рис. 6.**  $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$  – фазні струми ротора генератора

### Висновки

1. Аналіз електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою генератора в одну зірку з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок роторних обмоток машин модулятора під час її роботи на вузол асинхронних двигунів, показує, що принципово ця система електроживлення є роботпридатною.

2. На відміну від системи живлення за схемою модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора, стійкість роботи АСЕЖ за схемою модулятора з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора мало залежить від такого важливого параметра системи керування комутатором як вставка за струмом.

3. Вищий рівень стійкості роботи АСЕЖ за схемою модулятора з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора порівняно з їх спільним з'єднанням пояснюється досконалішою схемою модулятора, для якої при комбінованому з'єднанні не можливі короткозамкнені контури, наявність яких призводить до появи багатократних (на порядок більших) відносно номінальних струмів в комутаторі і роторах машин модулятора, що, своєю чергою, означає аварійний режим, тобто роботоне придатність такої системи живлення. Тому, на підставі наведених тут результатів аналізу перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, логічним є висновок про високий рівень надійності роботи АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ за схемою модулятора з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора і про практичну роботоне придатність цієї ж системи зі спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора.

### Список використаних джерел

1. Василів К. М. Узагальнена математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем за нульовою схемою / К. М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків:.. – 2009. – № 2. – С. 15–20.
2. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 /



Василів Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с.

3. Василів К. М. Порівняльний аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження / К. М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків.: – 2013. – № 1. – С. 12–16.
4. Галиновский А. М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А. М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромеханотронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С.182 – 192.

*Методом математического эксперимента выполнено исследование электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в автономной системе электропитания на базе асинхронизированного генератора с трехфазным модулированным возбудителем. Произведен анализ процессов на предмет работоспособности системы питания при ее работе на узел асинхронных двигателей. Установлено закономерности протекания электромагнитных и электромеханических процессов в зависимости от параметров системы управления коммутатором.*

***Асинхронизированный генератор, бесконтактный модулированный возбудитель, коммутатор, асинхронный двигатель, электромагнитные процессы, электромеханические процессы.***

*By the method of mathematic experiment, research in electromagnetic and electromechanical processes that occurs in the autonomous power supply system based on asynchronous generator with 3-phase modulated exciter has been conducted. The analysis of processes over serviceability of power system during its work on the site of induction motors has been made. Also the regularities of electromagnetic and electromechanical processes, depending on the system parameters of switch control have been established.*

***Asynchronous generator, contactless modulated exiter, commutator, asynchronous motor, electromagnetic processes, electromechanical processes.***