

К.М. ВАСИЛІВ, д-р техн. наук, зав. кафедри ЕТС, ЛНАУ, Львів

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ І СПІЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ ФАЗ МОДУЛЯТОРА ПІД ЧАС РОБОТИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

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 активно-індуктивне навантаження.

Ключові слова: автономний генератор, електромагнітні і електромеханічні процеси, трифазний модульований збуджувач.

Вступ. Стабілізування частоти напруги в автономних системах електроживлення, для яких характерна змінна швидкість обертання ротора генератора, продовжує залишатися актуальною і важливою науково-практичною проблемою. На сьогодні наука і практика в області електромеханіки та електроенергетики пропонує низку способів стабілізування частоти напруги. Аналіз літератури показує, що один із перспективних варіантів створення АСЕЖ полягає в їх побудові на базі асинхронізованих генераторів (АСГ) з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) [5]. Такі системи не лише забезпечують практично ідеальне стабілізування частоти напруги при змінній швидкості обертання ротора генератора, але ще й відзначаються високим рівнем надійності бо належать до безконтактних.

В [5] стабілізування частоти напруги ґрунтується на принципі модуляції напруги, що дає змогу в обмотці ротора генератора отримати струм частоти ковзання, а це, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора і, як наслідок, стабільну частоту напруги генератора.

Електромагнітні та електромеханічні процеси таких систем відзначаються особливою складністю.

© Василів К.М., 2012

Адже, до їх складу окрім самого генератора входять функційно пов'язані між собою дві асинхронні машини модулятора, циклоконвертор, а також застосовуються системи автоматичного керування (САК) відповідними координатами та система керування (СК) вентильним комутатором. Очевидно, що безпосередня розробка систем живлення такого типу має ґрунтуватися на всебічних ретельних теоретичних та практичних наукових дослідженнях як стосовно схемних рішень силового електричного кола, так і стосовно закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Результати одного з таких досліджень і становлять предмет цієї статті.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні загально визнано, що математичне моделювання слугує потужним і ефективним засобом дослідження процесів, які відбуваються в електротехнічних системах. Автор протягом останніх років виконав значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей і відповідних програмних комплексів автономних систем електроживлення на базі генераторів з БКМЗ, а також проведенням досліджень за допомогою розроблених математичних моделей. Так, у [1, 2] розроблено математичні моделі автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним та трифазно-трифазним БКМЗ. Характерною особливістю цих математичних моделей є те, що в них не передбачено наявності рушія ротора генератора, що істотно обмежує їх можливості. Безумовно, що такі обмеження становили істотний недолік математичних моделей. Тому на наступному етапі були розроблені математичні моделі, які дають змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси з врахуванням наявності в моделі рушія ротора генератора [3, 4].

Мета та завдання дослідження. З теоретичного обґрунтування функціонування систем генерування на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ відомо, що ці системи можуть формуватися за цілим сімейством схем силового електричного кола, які однозначно мають принциповий вплив на характер перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Окрім схем силового електричного кола на перебіг цих процесів впливає вид навантаження (тобто тип споживачів), а також 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 видів споживачів електроенергії їх параметрів та режимів роботи.

Задача дослідження в цій статті полягає в аналізі електромагніт-

них і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ зі спільним з'єднанням фаз модулятора за схемою генератора в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження (А-ІН). Схема силового електричного кола такої системи електроживлення зображена на рис. 1.

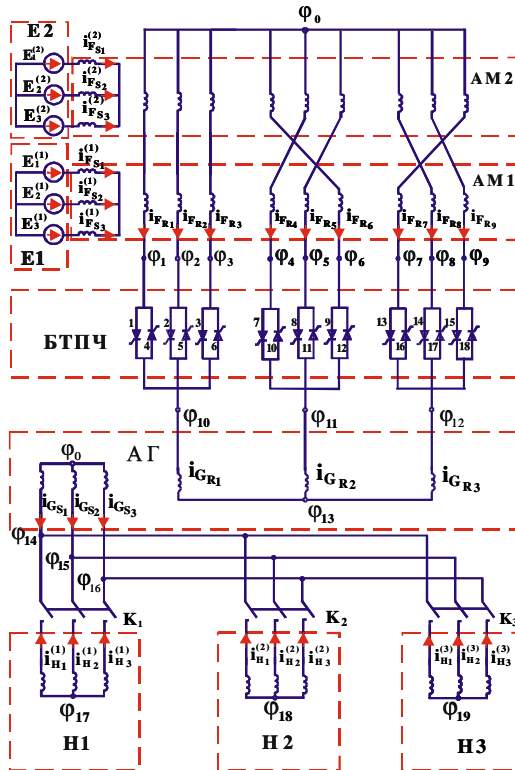


Рис. 1. Схема силового електричного кола АСЕЖ.

Виклад основного матеріалу. Отже, об'єктом дослідження є автономна система електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ, комутатором у якому слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ) за нульовою схемою. З рис. 1 видно, що структурними елементами схеми є: дві асинхронні машини АМ1 та АМ2; джерела живлення цих машин E_1 та E_2 відповідно; БТПЧ; генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої з'єднані в зірку. До системи живлення також

входять три споживачі (активно-індуктивні навантаження): H_1, H_2, H_3 . Ключі K_1, K_2, K_3 призначені для вмикання та відмикання споживачів. Решта позначень на схемі рис. 1 мають такий зміст. Літерами ϕ, i, E позначено: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами F, G, H в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та активно-індуктивного навантаження. Літерами S, R в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначено 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 AM_1, AM_2 та джерел живлення модулятора E_1 і E_2 .

Зі схеми силового електричного кола системи живлення рис. 1 видно, що кожна з фаз обмоток роторів AM_1 та AM_2 розділені на три гілки, які з боку виходу з AM_2 і входу до AM_1 з'єднані між собою послідовно з перехрещенням фаз. Саме таке сполучення AM_1 та AM_2 утворює функційний структурний елемент, який забезпечує модуляцію напруги і тому називається модулятором. На рис. 1 також видно, що фазні гілки роторної обмотки AM_2 з'єднані в один спільний вузол, який на схемі позначено через ϕ_0 і який прийнято за залежний вузол дільниці схеми. Зазначимо, що цей варіант з'єднання фазних гілок роторних обмоток машин модулятора є лише одним з трьох можливих. Окрім цього варіанта загалом передбачено ще комбіноване з'єднання з розподіленням потенціалів та пофазно-групове з'єднання [4, 5].

Дослідження АСЕЖ проведено за допомогою математичної моделі, розробленої в [3] та [4], а результати розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів отримані за допомогою програмних комплексів, розроблених за алгоритмами цих математичних моделей. Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого слугують розрахункові функціональні залежності миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора та машин модулятора і їх електромагнітних моментів.

Дослідження автономної системи електроживлення проведемо для асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Моделювання процесів виконаємо для режиму, в якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та розганяється ротор генератора. При досяг-

ненні швидкості обертання ротора близької до синхронної вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи по чергово вмикаються три споживачі: H_1 , H_2 , H_3 , а на останньому етапі споживачі по чергово відмикаються в зворотній послідовності: H_3 , H_2 , H_1 . Протягом цілого робочого циклу функціонують САК для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ [3, 4].

З метою вивчення функціонування системи живлення загалом і стійкості роботи комутатора зокрема під час її роботи на $R-L$ навантаження, проведемо розрахунки електромагнітних процесів для декількох різних за величиною значень активного опору та індуктивності навантаження, а також для декількох різних коефіцієнтів потужності $R-L$ навантажень. Низка попередніх досліджень показують, що ці параметри мають істотний вплив на стійкість роботи комутатора, що є визначальним для функціонування такої системи живлення в принципі.

АСЕЖ призначена для забезпечення споживача електроенергією високої якості за найважливішими параметрами, до яких належить стабільність амплітуди і частоти напруги. Про якість електроенергії за критерієм стабільності амплітуди напруги і відповідно про роботоздатність систем живлення цього типу можна робити висновок на підставі аналізу характеру розрахункових залежностей таких інтегральних координат як модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$.

На рис. 2 зображені розрахункові залежності цих важливих координат, отриманих для роботи АСЕЖ на три активно-індуктивні навантаження з однаковими параметрами: $R_H^{(1)} = R_H^{(2)} = R_H^{(3)} = 10 \text{ Ом}$, $L_H^{(1)} = L_H^{(2)} = L_H^{(3)} = 0,06336 \text{ Гн}$, а отже коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,6$. 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 відрізку спостерігається поява і зростання струму збудження (струму в обмотці ротора генератора) і, як наслідок, напруги статора генератора. Генератор працює в режимі неробочого ходу в діапазоні від $t=3$ до $t=5$ секунд. Починаючи з моменту часу $t=5$ секунд, через кожен секунду вмикаються споживачі в послідовності: H_1 , H_2 , H_3 . На проміжку часу від $t=7$ до $t=9$ секунд генератор працює на всі три споживачі. А, починаючи з $t=9$, споживачі вимикаються в зворотній до увімкнення послідовності: H_3 , H_2 , H_1 .

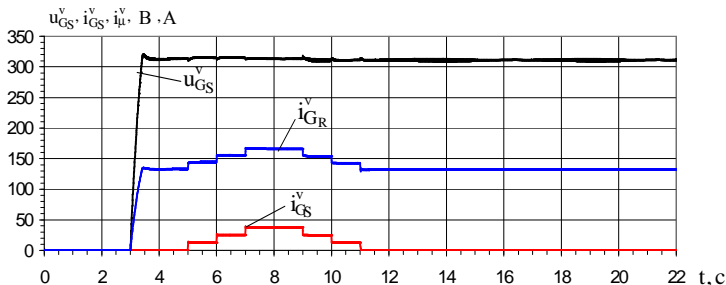


Рис. 2. u_{GS}^v , i_{GS}^v , i_{μ}^v – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів фазних гілок ротора генератора.

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 споживачів, перебуває в допустимих стандартами межах відхилення від заданого значення 311 В. Вирішальну роль у забезпеченні необхідного і очікуваного характеру цих координат відіграє стійкість роботи комутатора. А це залежить від багатьох чинників, серед яких параметри машин модулятора і генератора, алгоритм і функціонування СК комутатором та САК стабілізування визначених координат, а також параметри та режими роботи споживачів. З цього рисунку також видно, що система автоматичного керування виконує свою функцію стабілізування амплітуди напруги статора генератора, а інші координати відображають поведінку системи в межах робочого циклу.

Важливу роль у функціонуванні системи збудження і АСЕЖ загалом відіграє перебіг електромагнітних процесів у модуляторі. Тому перейдемо до аналізу струмів і напруг модулятора.

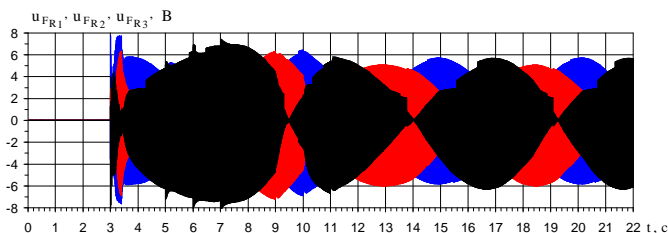


Рис. 3. Розрахункові залежності миттєвих значень напруг першої групи фазних гілок роторів машин модулятора u_{FR1} , u_{FR2} , u_{FR3} .

На рис. 3 зображені розрахункові залежності від часу миттєвих значень спадів напруг першої трифазної групи фазних гілок роторів машин модулятора. З рис. 3 видно, що криві напруг мають модульовану форму з частотою ковзання і частотою заповнення, значення якої залежить від швидкості обертання ротора генератора.

Аналогічно на рис. 4 зображено розрахункові залежності миттєвих значень електричних струмів послідовно з'єднаних фазних гілок першої трифазної групи роторів машин модулятора.

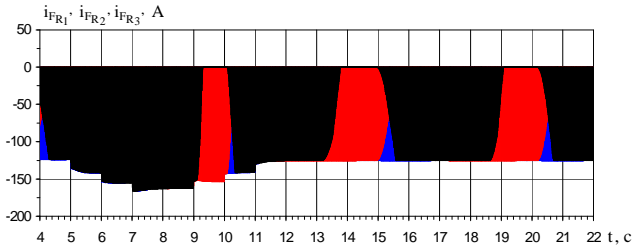


Рис. 4. i_{FR1} , i_{FR2} , i_{FR3} – миттєві струми першої трифазної групи фазних гілок роторів машин модулятора.

Криві на рис. 3 та 4 виразно відображають фізику процесів, внаслідок яких отримано електричні напруги та струми модульованої форми частоти ковзання. Як бачимо з рис. 3 та 4, на проміжку часу, де ковзання дорівнює нулю ($S=0$), спостерігаємо напруги без модуляції частотою заповнення $f_3=150$ Гц. Оскільки фазні напруги зсунуті між собою на 120° , а розгалужені фазні гілки роторів $AM1$ та $AM2$ для другої та третьої фазних груп сполучені між собою перехресно зі зсувом на 120° (див. схему рис. 1), то за частотою модуляції кожна з трьох трифазних груп напруг та струмів також зсунуті між собою на кут 120° . Амплітуди напруг і струмів змінюється залежно від зміни електрорушійних сил джерел живлення, а ця, своєю чергою, таким чином, щоб підтримувати потрібне значення струму збудження (амплітуди фазних струмів обмотки ротора генератора).

З рис. 2-4 видно, що модулятор, згідно з теоретичним передбаченнями виконує свою функцію – утворення напруг модульованої форми, необхідних для формування циклоконвертером 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 джере-

лом таких збурень слугує вмикання та відмикання споживачів. Очевидно, що напруги та струми фазних гілок роторів машин модулятора також повинні реагувати і на ці збурення. З візуального аналізу форми кривих напруг та струмів, зображених відповідно на рис. 3 та 4, виразно видно, що криві цих напруг та струмів зазнають істотного деформування яке, спричинено перехідними процесами, які, своєю чергою, виникли внаслідок ввімкнення та відімкнення навантаження. З рис. 4 видно, що амплітуда струмів фазних гілок роторів машин модулятора змінюється залежно від стану споживачів. Для ввімкненого стану струми збільшуються, а для вимкненого стану – вони зменшуються.

Визначальний вплив на перебіг процесів у таких системах та їх функціонування загалом мають процеси в обмотці збудження генератора. Тому інформація про характер електричних струмів та напруг у обмотці ротора генератора має принципово важливе значення. Проаналізуємо розрахункові залежності цих струмів, які зображені на рис. 5.

Форма кривих на цьому рисунку виразно вказує на те, що модульований перетворювач частоти дає змогу отримати високоякісні струми збудження, що слугує необхідною передумовою для отримання високоякісної напруги за критерієм гармонічного спектра. З рис. 5 також видно, що струми збудження мають частоту ковзання, а це, своєю чергою, гарантує отримання магнітного поля, яке обертається стосовно обмотки ротора з частотою ковзання, а значить з постійною частотою стосовно обмотки статора генератора. Саме це і дає змогу отримати напругу стабільної частоти за умов змінної швидкості обертання ротора генератора і саме в цьому полягає принцип функціонування систем генерування на базі БКМЗ.

Як зазначалося вище, основне завдання дослідження в цій статті полягає у вивченні закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Враховуючи те, що всі без винятку координати цієї автономної системи електроживлення перебувають у функційних взаємних зв'язках, то для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ під час її роботи на активно-індуктивне навантаження важливо з'ясувати яким є вплив параметрів $R-L$ навантаження на роботу системи. З цією метою проведено моделювання перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в зазначеній АСЕЖ для декількох значень активного опору R_H при заданому значенні $\cos \varphi$ та для декількох значень $\cos \varphi$ при постійному заданому значенні активного опору R_H . Це дало змогу вивчити вплив активного опору та коефіцієнта потужності на роботу АСЕЖ на

базі АСГ з БКМЗ під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Очевидно, що на стійкість роботи АСЕЖ мають вплив і інші чинники: параметри електричних машин та схемні рішення.

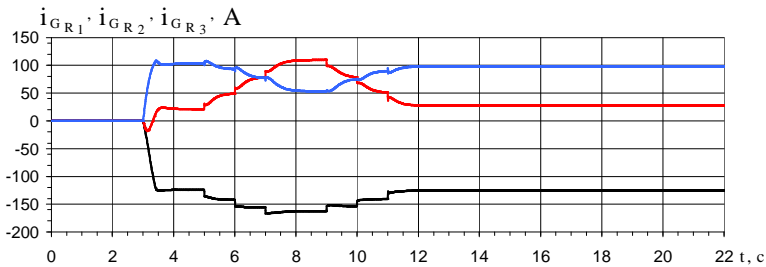


Рис. 5. $i_{GR_1}, i_{GR_2}, i_{GR_3}$ – миттєві струми ротора генератора.

З наведених вище результатів моделювання (рис. 2 – рис. 5) видно, що для вибраних параметрів навантаження АСЕЖ за схемою рис. 1 працює стабільно. Але при збільшенні навантаження (тобто зменшенні активного опору R_H) стійкість роботи системи порушується. Дослідження також показали, що з підвищенням коефіцієнта потужності стійкість роботи комутатора, а значить і системи живлення загалом також порушується.

На рис. 6 зображені розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів фазних гілок ротора генератора $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ під час роботи на активно-індуктивне навантаження з такими параметрами: $R_H=10$ Ом, $L_H=0,02387$ Гн, а отже коефіцієнтом потужності $\cos \varphi=0,8$.

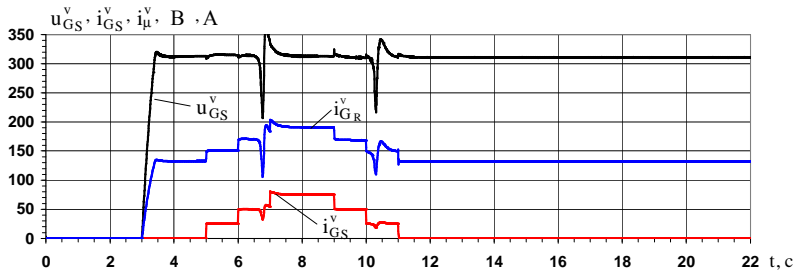


Рис. 6. $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора для навантаження: $R_H=10$ Ом, $L_H=0,02387$ Гн.

З цього рисунку видно, що характер інтегральних координат істотно змінився зі збільшенням навантаження і підвищенням коефіцієнта потужності. Судячи з рисунку, це виразно проявляється в провалах кривих напруги та струмів. Отже, на стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом має істотний вплив інтенсивність перехідних процесів, бо збої в роботі комутатора (рис. 6) спостерігаються в околі моменту часу вмикання та вимикання споживачів.

Отримані результати дослідження АСЕЖ за схемою генератора в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок ротора модулятора під час її роботи на активно-індуктивне навантаження дають підставу узагальнити думку про закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів в цій системі живлення залежно від параметрів навантаження. Ці узагальнення сформулюємо у таких висновках.

Висновки.

1. Аналіз електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою генератора в одну зірку і з'єднанням фазних гілок роторних обмоток машин модулятора в один спільний вузол під час її роботи на активно-індуктивне навантаження, доводить, що принципово вона є роботопридатною.

2. На стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом істотний вплив мають параметри активно-індуктивного навантаження.

3. Робота АСЕЖ є стійкою і стабільною для практично достатнього діапазону активно-індуктивного навантаження в області його коефіцієнта потужності до $\cos \varphi=0,6$.

4. Стійкість функціонування системи даного класу під час її роботи на активно-індуктивне навантаження для вищих значень коефіцієнта потужності можлива за умови зменшення навантаження і навпаки.

Список літератури: 1. *Василів К.М.* Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С. 54-60. 2. *Василів К.М.* Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 50-55. 3. *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. 4. *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. 5. *Галинов-*

ский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А.М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С. 182-192.



Василів Карл Миколайович, доктор технічних наук.

Захистив диплом інженера у Львівському політехнічному інституті в 1978 році за фахом „Електричні машини та апарати”. Дисертація кандидата технічних наук захищена в Ленінградському технічному університеті за спеціальностями: „Електричні машини” та „Електротехнічні комплекси і системи” в 1991 р., м. Санкт-Петербург, Росія. Дисертація доктора технічних наук захищена в Національному університеті біоресурсів і природокористування України за спеціальністю: „Електротехнічні комплекси і системи” в 2010 р., м. Київ.

Завідувач кафедри електротехнічних систем Львівського національного аграрного університету з 2011 року.

Наукова діяльність пов'язана з математичним моделювання електромеханічних комплексів на базі електричних машин включно з трансформаторами та вентиляними перетворювачами частоти.

Поступила в редколегію 02.10.2012

УДК 621.313.333: 621.314.54: 621.316.765

Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження / Василів К.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 27-37. Бібліогр.: 5 назв.

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 активно-индуктивную нагрузку.

Ключевые слова: автономный генератор, электромагнитные и электромеханические процессы, трехфазный модулированный возбудитель.

By means of mathematical experiment investigation of electromagnetic and electromechanical processes which take place in the independent electric power supply system based on an asynchronized generator with three-phase modulated exciter is carried out. The processes are analyzed to find out the working capacity level of the power supply system during its work under active-inductive load.

Keywords: independent generator, electromagnetic and electro-mechanical processes, phase modulated exciter.