

УДК 621.313

К. М. ВАСИЛІВ

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗКОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА СХЕМОЮ У ДВІ ЗІРКИ НА БАЗІ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРУГИ

Встановлено закономірності перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються у безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги на предмет можливості збільшення двозонного ковзання генератора. Запропоновано спосіб корегування параметрів роторів машин модулятора, який дає змогу стабілізувати роботу комутатора для практично необхідних значень ковзання. Досягнуто значного розширення діапазону ковзання – до двох десятків із забезпеченням роботоздатності асинхронізованого генератора

Ключові слова: асинхронізований генератор, модулятор напруги, комутатор, безконтактна система збудження, ковзання.

Установлено закономерности электромагнитных процессов, протекающих в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного генератора на базе трехфазно-трехфазного модулятора напряжения на предмет возможности увеличения двухзонного скольжения генератора. Показано, что величина параметров обмоток роторов машин модулятора напряжения непосредственно влияет на стабильность работы вентильного коммутатора и системы возбуждения в целом. Достигнуто расширение диапазона двухзонного скольжения – до двух десятых с обеспечением работоспособности асинхронизированного генератора.

Ключевые слова: асинхронизированный генератор, модулятор напряжения, коммутатор, бесконтактная система возбуждения, скольжение.

By means of mathematical modeling there have been studied regularities of electromagnetic processes taking place in the contactless excitation system of an asynchronous generator based on cascade, three-phase-three-phase voltage modulator. There have been found the regularities of these processes with the aim to examine the impact of changes in slip resistance of the generator on the stability of the switch operation and, as a result, on the stability of the excitation system and the generator as a whole. There is offered a method of adjusting parameters of the modulator rotor machine that allows stabilizing the switch and excitation system operation to get the sliding values sufficient for the generator to work in practice. The sliding range has been greatly expanded, up to two tenths, ensuring operation suitability of the asynchronous generator in this range

Key words: asynchronous generator, voltage modulator, switch, contactless excitation system, slide.

Вступ. Частота електричної напруги є одним з основних параметрів якості електроенергії. Це стосується як автономних систем електроживлення, характерною особливістю яких є нестабільність обертання ротора, що за умов використання як генераторів машин змінного струму створює складну проблему – нестабільність частоти. Ця проблема є актуальною і для електростанцій, які слугують основою стаціонарної енергосистеми. Зокрема, на теплових електростанціях використовується велика кількість механізмів власних потреб (живильні помпи, димотяги, дуттєві агрегати і т. ін.), які приводяться в рух асинхронними двигунами (АД). Механічний момент опору таких агрегатів має нелінійну характеристику і описується функційною залежністю вищих порядків (4-го і навіть 5-го ступеня) від частоти обертання. Це означає, що продуктивність таких АД, а значить і відповідних механізмів, нелінійно залежить від частоти напруги, якою живляться ці двигуни. Не достатня продуктивність відповідальних механізмів власних потреб енергоблоків призводить до зниження крутильного моменту турбогенератора і, як наслідок, до зниження частоти напруги. Такі явища спричиняють порушення стійкості роботи як окремих енергоблоків, так і електростанцій і навіть енергосистем загалом.

Аналіз наукових літературних джерел та наявних технічних рішень дає підставу стверджувати, що до одного з перспективних способів стабілізування частоти напруги за умови змінної частоти обертання валу генератора можна віднести асинхронізований генератор з безконтактним збуджувачем на базі каскадного модулятора напруги. У наукових літературних джерелах він увійшов ще під назвою генератора стабільної частоти (ГСЧ) [6]. Схема силового електричного кола такого генератора зображена на рис. 1. Її

структурними елементами є: трифазно-трифазний модулятор, який складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розщеплені на три гілки та з'єднані між собою послідовно перехресними зв'язками, а на вході сполучені в один спільний вузол. Статорні обмотки машин модулятора АМ1 та АМ2 живляться від двох джерел живлення Е1 та Е2, які мають взаємно протилежну послідовність фаз. До решти структурних елементів схеми рис. 1 належать: ТК – тиристорний комутатор циклоконверторного типу, яким слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ), АГ – асинхронізований генератор (далі АСГ), яким слугує асинхронна машина, кожна з фаз обмотки ротора якої розщеплена на дві гілки та з'єднані у дві окремі зірки.

Всі решта позначення на схемі рис. 1 є загальноприйнятими – літерами Е, ф, і позначені електрорушійні сили джерел напруги, електричні потенціали у вузлах та струми електричних гілок схеми. Літерами F, G у нижніх індексах позначено належність координат (струмів, напруг і т. ін.) до машин модулятора та АСГ відповідно, а літерами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних координат до статора і ротора електричних машин. Тиристри БТПЧ пронумеровані числами. Числами 1 та 2 в дужках у верхніх індексах позначено належність до першої Е1 та другої Е2 електричних мереж відповідно.

На рис. 1 зображена лише одна із схем ГСЧ. Загалом тут можливими є 8 різних схем, які відрізняються між собою сполученням розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора та сполученням розщеплених фазних гілок ротора генератора (або наявність лише однієї з них). Окремі схеми отримуються шляхом комбінації з'єднань фазних гілок роторів машин модулятора і АСГ.

© К. М. Василів, 2016

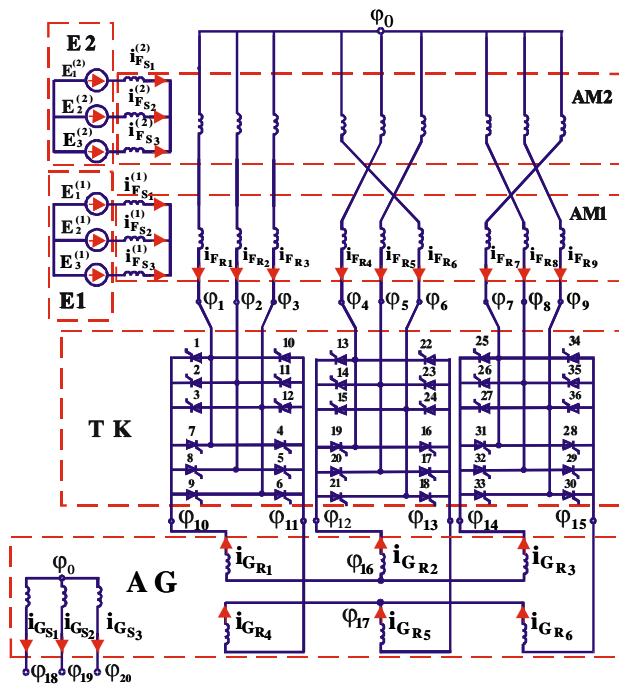


Рис. 1 – Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора.

З погляду викладу матеріалу логічною є потреба нагадати, що принцип функціонування ГСЧ ґрунтується на тому, що модулятор напруги формує модульовану напругу, частота заповнення якої пропорційна частоті обертання роторів машин модулятора і кількості їх пар полюсів (ротори АМ1 та АМ2 розміщені на одному валі з АСГ), а частота модуляції визначається частотою двозонного ковзання. Комутатор декодує модульовану напругу, внаслідок чого на його виході (на обмотці ротора генератора) утворюється система фазних напруг частоти ковзання. Це забезпечує стабільну частоту обертання магнітного поля генератора стосовно його обмотки статора, що, своєю чергою, формує частоту напруги генератора, яка дорівнює частоті мереж живлення E1 та E2. Отже, гіпотетично частота напруги АСГ дорівнює частоті мереж живлення E1 та E2 асинхронних машин модулятора АМ1 та АМ2 і не залежить від частоти обертання ротора АСГ.

Аналіз останніх досліджень. Складність схеми рис. 1 з погляду наявності багатьох різнотипових елементів – асинхронних машин та БТПЧ, а також необхідність у системі керування комутатором та системі автоматичного керування окремими координатами, зокрема напругою, спричинює складність електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в ГСЧ. Ці обставини зумовили потребу у всебічному дослідженні як самого ГСЧ, так і автономних систем електроживлення на базі таких генераторів.

Дослідження проводилися методом математичного моделювання. Для цього були розроблені математичні методи і моделі, а також на їх підставі алгоритми і відповідні програмні комплекси, які дають змогу за допомогою персональних комп'ютерів моделювати електромагнітні і електромеханічні процеси, що відбуваються в таких системах з метою встановлення закономірностей їх перебігу на предмет роботоздатності таких систем електроживлення.

Так у [1] розроблено математичну модель АСГ з безконтактним збуджувачем на базі трифазно-трифазного модулятора, а у [2] виконано математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу АСГ з безконтактним збуджувачем на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора. У [3] розроблено математичну модель для дослідження динамічних процесів автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним збуджувачем на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора. Математична модель і відповідний програмний комплекс дає змогу вивчати електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються у автономній системі живлення під час роботи АСГ на типові навантаження, яким слугують асинхронні двигуни, статичне навантаження та активно-індуктивно-ємнісне навантаження.

Враховуючи можливість створення безконтактної системи збудження АСГ на базі двофазно-трифазного модулятора, з одного боку, та особливості електромагнітних процесів, які відбуваються в таких системах, з другого боку, в [4] розроблено математичну модель для дослідження динамічних процесів автономної системи електроживлення на базі АСГ з безконтактним збуджувачем на базі каскадного двофазно-трифазного модулятора. Ця математична модель як і [3] дає змогу вивчати електромагнітні процеси і для самого АСГ, коли він працює в режимі неробочого ходу, і для режимів роботи генератора на визначений клас типових навантажень (АД, R-L та R-L-C навантаження).

Великий обсяг всебічних досліджень та отримані результати і з погляду типу схем силового електричного кола, і з погляду типу навантажень та режимів роботи ГСЧ переконливо вказує на те, що загалом ГСЧ є роботопридатним. Дуже важливим є питання діапазону ковзання. За результатами досліджень ГСЧ є роботопридатним у діапазоні ковзання $\pm 0,06$. Вважалося, що машини модулятора напруги мають класичну будову і відповідні параметри.

Задачі дослідження. Отриманий результат досліджень, з одного боку, сприймався позитивним, а, з другого, – ставив питання про необхідність вивчення можливості збільшення діапазону двозонного ковзання з метою розширення області практичного застосування ГСЧ. Отже завданням дослідження є встановлення закономірностей перебігу електромагнітних процесів АСГ з безконтактною системою збудження на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги на предмет можливості розширення робочого діапазону двозонного ковзання.

Викладення основного матеріалу. Ретельний аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються у системі збудження показує, що із зростанням ковзання збільшується індуктивний опір роторних обмоток машин модулятора, що спричинює витиснення вентильних груп БТПЧ, а це, своєю чергою, унеможливає формування системи фазних напруг частоти ковзання. Безконтактна система збудження, а разом з нею і сам ГСЧ не працює.

З метою створення сприятливих умов роботи комутатора на підставі аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються у безконтактній системі збуд-

ження, пропонується зменшити індуктивні опори роторних обмоток машин модулятора. В математичному моделюванні це досягається збільшенням співвідношення кількості витків обмоток статора і ротора машин модулятора (тобто, збільшенням коефіцієнта трансформації). Перевірку впливу зміни коефіцієнта трансформації на роботопридатність генератора виконаємо аналізом функційних залежностей основних електромагнітних координат, отриманих за допомогою математичного моделювання. Для цього розглянемо розрахункові залежності напруг і струмів машин каскадного модулятора і генератора, отриманих для коефіцієнта трансформації машин модулятора $K_i=20$. В описаних вище дослідженнях його значення дорівнювало 5 ($K_i=5$).

На рис. 2 зображені розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора. Зокрема, рис. 2, а ілюструє напруги перших трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора $u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ (див. рис. 1). Кожна з цих кривих формується сумою електрорушійних сил послідовно з'єднаних розщеплених фазних гілок першої групи роторів машин модулятора АМ1 та АМ2. А ці електрорушійні сили, своєю чергою, індукуються окремо для кожної з машин АМ1 та АМ2 струмами обмоток їх статорів. Аналогічно рис. 2, б ілюструє напруги $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ других трьох, а рис. 2, в – напруги $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ третіх трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (див. рис. 1).

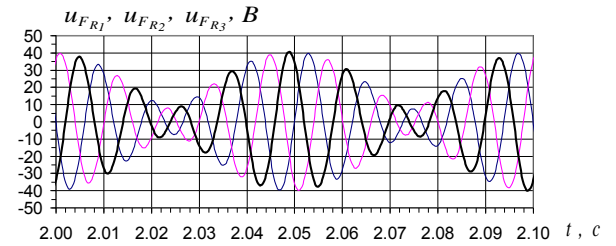
З рис. 2 видно, що напруги послідовно з'єднаних фазних гілок роторів машин каскадного модулятора мають модульовану форму з частотою ковзання (тут для підслідного режиму ковзання $S=0,2$), яка відповідає періоду $T=0,1$ с. При цьому кожна з трьох систем напруг, зображених на рис. 2, а, б, в зсунуті за фазою на кут $2\cdot\pi/3$, що досягається перехресним з'єднанням розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (див. рис. 1). Модульована форма напруг з частотою ковзання дає підстави очікувати формування системи фазних напруг частоти ковзання у роторній обмотці генератора. Факт зсуву напруг всіх трьох груп фазних гілок за частотою ковзання на $2\cdot\pi/3$ забезпечує відповідний зсув фазних напруг і струмів обмотки ротора генератора.

Проаналізуємо основні координати генератора. На рис. 3 зображено розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок ротора генератора. Фазні напруги першої зірки обмотки ротора асинхронізованого генератора $u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ зображені на рис. 3, а, а фазні напруги другої зірки обмотки ротора генератора $u_{GR4}, u_{GR5}, u_{GR6}$ зображені на рис. 3, б.

З рис. 3 видно (як і передбачалося на підставі кривих рис. 2), що напруги фазних гілок ротора генератора зсунуті за фазою між собою на кут $2\cdot\pi/3$ і мають синусоїдну за основною гармонікою форму з частотою ковзання, що, своєю чергою, дає підстави очікувати отримання задовільної форми струмів фазних гілок ротора генератора і як наслідок – синусоїдну форму напруг обмотки статора стабільної частоти і прийнятної з погляду якості електроенергії

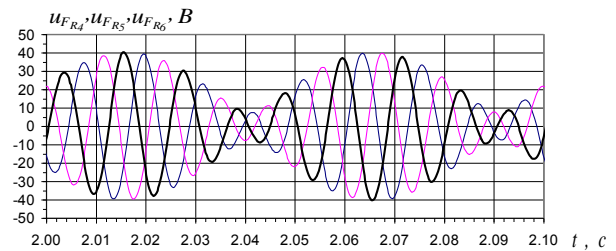
гармонічного спектру.

З метою отримання достовірної інформації стосовно форми струмів фазних гілок ротора генератора їх криві зображені на рис. 4.



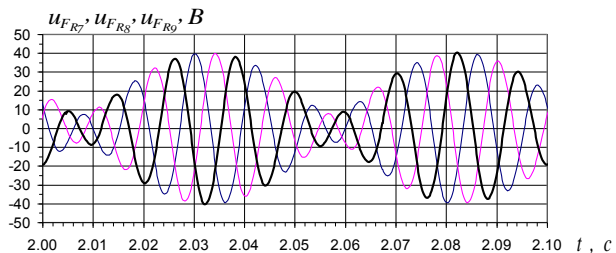
а

$u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ – напруги 1-3 фазних гілок роторів АМ;



б

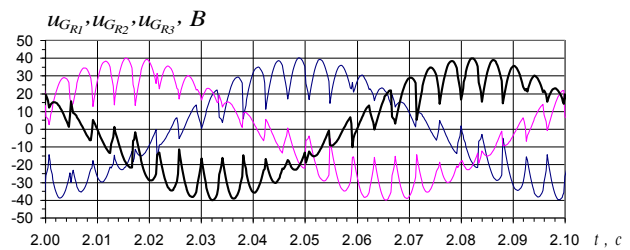
$u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ – напруги 4-6 фазних гілок роторів АМ;



в

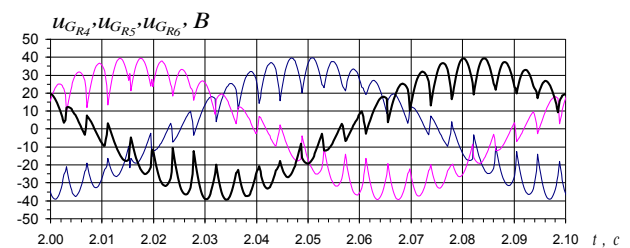
$u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ – напруги 7-9 фазних гілок роторів АМ;

Рис. 2 – Розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора.



а

$u_{GR1}, u_{GR2}, u_{GR3}$ – напруги фаз I-ї зірки ротора АСГ;

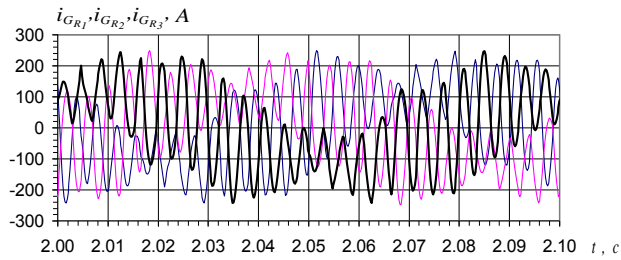


б

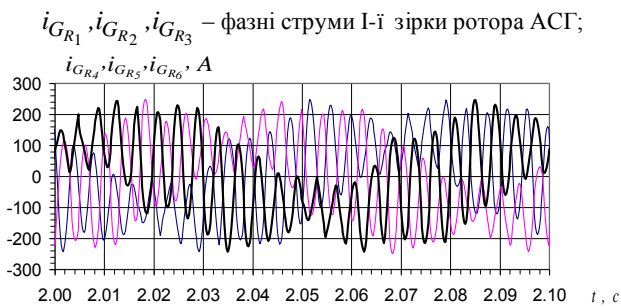
$u_{GR4}, u_{GR5}, u_{GR6}$ – напруги фаз II-ї зірки ротора АСГ;

Рис. 3 – Розрахункові залежності напруг фазних гілок першої та другої зірок ротора асинхронізованого генератора

На рис. 4 а зображені фазні струми $i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}}$ першої зірки обмотки ротора генератора, а на рис. 4 б зображені фазні струми $i_{G_{R4}}, i_{G_{R5}}, i_{G_{R6}}$ другої зірки обмотки ротора генератора.



а



б

$i_{G_{R4}}, i_{G_{R5}}, i_{G_{R6}}$ – фазні струми II-ї зірки ротора АСГ;

Рис. 4 – Розрахункові залежності струмів фазних гілок першої та другої зірок ротора асинхронізованого генератора

З цього рисунку видно, що струми фазних гілок ротора генератора також мають близьку до синусоїди форму, що є логічним стосовно форм відповідних напруг рис. 3.

Намагнічувальна сила генератора створюється пів-сумою струмів фазних гілок ротора першої та другої зірок (для схеми АСГ з двома зірками), тобто $i_{G_{\mu j}} = (i_{G_{Rj}} + i_{G_{Rj+3}}) / 2$ ($j = 1, 2, 3$). Від форми та величини цих струмів залежить форма і амплітуда фазних напруг статора генератора. Тому для аналізу електромагнітних процесів принципово важливо мати функційні залежності цих струмів, які слугують еквівалентом намагнічувальної сили генератора.

На рис. 5 зображені розрахункові залежності усереднених струмів фазних гілок ротора генератора першої та другої зірок. Цей рисунок виразно ілюструє синусоїдну форму струмів, які є еквівалентом намагнічувальної сили ротора генератора, що аргументовано дає підставу очікувати синусоїдну форму фазних напруг статора генератора.

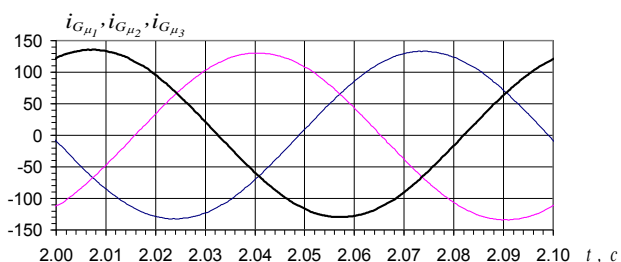


Рис. 5 – Розрахункові залежності половини суми струмів фазних гілок ротора генератора $i_{G_{\mu 1}}, i_{G_{\mu 2}}, i_{G_{\mu 3}}$.

З погляду остаточного результату в контексті роботопридатності генератора достатньо повну відповідь можна отримати на підставі аналізу форми кривих фазних напруг статора генератора, які зображені на рис. 6. З цього рисунку виразно видно, що криві фазних напруг статора генератора мають синусоїдну форму частотою $f=50$ Гц, хоча ковзання генератора є доволі великим і становить $S=0,2$. Крім цього, амплітуда напруги має строго визначене значення, яке дорівнює $U_m=310$ В, адже саме на це значення налаштована система автоматичного регулювання напруги, яка зrealізована пропорційно-інтегральним регулятором.

В статті наведено аналіз електромагнітних процесів для постійного ковзання та для однієї схеми модулятора і генератора. В перспективі ставиться за мету проаналізувати динамічні режими (для змінного ковзання) з врахуванням всіх інших можливих схем силового кола асинхронізованого генератора і його системи збудження.

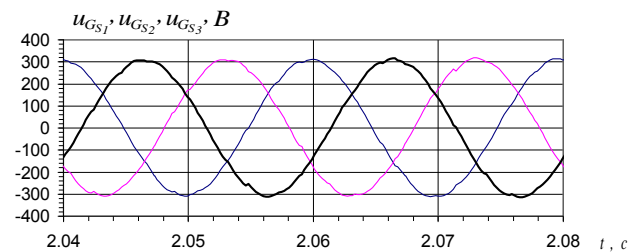


Рис. 6 – Розрахункові залежності $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}$ фазних напруг статора генератора.

Висновки. Досліджено вплив параметрів роторів машин каскадного модулятора напруги на перебіг електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора. На підставі аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора встановлено, а математичним моделюванням підтверджено, що значення параметрів машин модулятора мають визначальний вплив на функціонування тиристорного комутатора, а значить і системи збудження загалом. Встановлено, що збільшення співвідношення витків обмоток статора і ротора машин модулятора дає змогу розширити робочий діапазон ковзання до $S=0,2$ (проти відомого $S=0,06$), що, своєю чергою, сприяє розширенню області практичного застосування таких генераторів.

Список літератури

1. Василів К. М. Математична модель безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2003. – Частина 3. – С.72–79.
2. Василів К. М. Математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2004. – Ч. 2. – С.99–105.
3. 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.
4. 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.
 5. 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.
 6. Галиновский 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.

References (transliterated)

1. Vasylyv K. M. Matematychna model bezkontaktного asynkronizovanogo generatora z tryfazno-tryfaznym modulovanyim zbudzhuvachem. *Texnichna elektrodynamika: Tematychnyj vypusk „Sylova elektronika ta energoefektyvnist”*. 2003. Chastyna 3. p.72–79.
2. Vasylyv K. M. Matematychni modelyuvannya dynamichnyx procesiv nerobochogo ходу avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy` na bazi generatora z bezkontaktny`m tryfazno-tryfazny`m kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. *Texnichna elektrodynamika: Tematychnyj vypusk „Sylova elektronika ta energoefektyvnist”*. 2004. Ch. 2. p. 99–105.
3. Vasylyv K. M. Matematychna model` dynamichnyx procesiv avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi bezkontaktного asynkronizovanogo generatora z tryfazno-tryfazny`m kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. *Texnichna elektrodynamika*. 2004. No 5. P. 50–55.
4. Vasylyv K. M. Matematychna model` dynamichnyx procesiv avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi bezkontaktного asynkronizovanogo generatora z dvofazno-tryfaznym kaskadnym modulovanyim zbudzhuvachem. *Texnichna elektrodynamika*. – 2005. – No 2. – S.54–60.
5. Vasylyv K. M. Uzagalnena matematychna model avtonomnoyi elektroenergetychnoyi systemy na bazi asynkronizovanogo generatora z bezkontaktnym kaskadnym tryfazno-tryfaznym modulovanyim zbudzhuvachem za nulovoyu sxemoyu Elektrotehnika i elektromexanika. Kharkov: 2009. No 2. P. 15–20.
6. Galynovskiy A. M. Beskontaktnyj asynkronizirovannyj generator s modulirovannym preobrazovatelem chastoty. *Trudy I Mezhdunarodnoj (III Vserossyjskoj) konferencyu` po Elektromexanotrynye. Sankt-Peterburgskiy gos. elektrotexn. un-t*. 1997. P.182-192.

Надійшла (received) 15.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора за схемою у дві зірки на базі трифазно-трифазного модулятора напруги / К. М. Василів // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – X. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 48-52. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Закономерности электромагнитных процессов бесконтактной системы возбуждения асинхронизированного генератора по схеме в две звезды на базе трехфазно-трехфазного модулятора напряжения / К. Н. Васильев // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – X. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 48-52. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Regularities of electromagnetic processes in the contactless excitation system of an asynchronous generator following a two-star scheme based on a threephase-threephase voltage modulator / К. М. Vasylyv // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 48-52. Bibliography: 6. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Василів Карл Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри „Електричні станції” Національного університету „Львівська політехніка”, м. Львів; тел.: 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.

Васильев Карл Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры „Электрические станции” Национального университета „Львівська політехніка”, г. Львов; тел.: 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.

Vasylyv Karl Mykolayovych – Doctor of Engineering Sciences, Professor, of the Department of Electric Power Stations „Lviv polytechnic” National university, Lviv; tel 0972453821; e-mail: karl.vasylyv@gmail.com.