

К.М. Василів

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗКОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ КАСКАДНОГО ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРУГИ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ

Встановлено закономірності перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку на предмет можливості розширення діапазону двозонного ковзання генератора. Запропоновано спосіб корегування параметрів роторів машин модулятора і генератора, який дає змогу стабілізувати роботу комутатора для діапазону ковзання від мінус одиниці до плюс n яти десятих із збереженням працездатності асинхронізованого генератора. Бібл. 3, рис. 8.

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

Установлено закономерности электромагнитных процессов, протекающих в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного генератора на базе каскадного трехфазно-трифазного модулятора напряжения по схеме в одну звезду на предмет возможности расширения диапазона двухзонного скольжения генератора. Предложено способ корректировки параметров роторов машин модулятора и генератора, позволяющий стабилизировать работу коммутатора для диапазона скольжения от минус единицы до плюс пяти десятых с сохранением работоспособности асинхронизированного генератора. Библ. 3, рис. 8.

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

Вступ. Базовими структурними елементами сучасних стаціонарних електроенергетичних систем є теплові та атомні електричні станції. Водночас практикується використання доволі великої кількості різноманітних автономних електроенергетичних установок (АЕЕУ) як у промисловості, так і в інших галузях, зокрема, на транспорті та в агро-промисловому комплексі. Є потреба в АЕЕУ також на магістралях транспортування органічних енергоносіїв (нафтопроводах та газогонах). Перспективним вбачається використання вітроенергетичних установок, які можуть працювати як паралельно зі стаціонарною енергосистемою, так і в автономному режимі. АЕЕУ на сьогодні становлять вагомий частку генерування та споживання електроенергії загалом. Тому увага до них, з погляду наукових досліджень як в теоретичному, так і в практичному аспектах з метою їх вдосконалення, є достатньо аргументованою і закономірною.

Для споживачів електроенергії необхідно мати не лише надійне електроживлення, але й отримувати якісну електроенергію, одним з найважливіших показників якої є частота напруги. Стабільність частоти напруги принципово необхідна як для стаціонарних енергосистем, так і для автономних джерел електроживлення (АДЕЖ). Адаже зниження частоти напруги в стаціонарних енергосистемах призводить до втрати стійкості їх роботи і, як наслідок, до розвалу.

Для АДЕЖ характерні певні особливості до найвагоміших з яких логічно віднести такі. Перше – висока ймовірність необхідності роботи в режимі граничних навантажень, що робить актуальною проблему надійності їх функціонування загалом. Друга особливість таких установок полягає в істотній нестабільності та широкому діапазоні зміни частоти обертання ротора автономного генератора, наприклад, вітроенергетичних установок (ВЕУ), що спричиняє іншу складну проблему – нестабільність частоти напруги.

Аналіз наукової літератури та практичних рішень показують, що обидві ці складні і актуальні проблеми можуть бути ефективно вирішені використанням у АДЕЖ асинхронізованих генераторів (АСГ) з безконтактною вентиляльною системою збудження (БВСЗ) на базі каскадного модулятора напруги (КМН) [3]. З погляду схемного рішення асинхронізовані генератори з БВСЗ на базі КМН можуть бути реалізовані в багатьох варіантах (порядку 16-ти схем). Всі такі генератори працюють за однаковим принципом, але кожне схемне рішення силового електричного кола модулятора, комутатора і самого генератора вносить свої специфічні особливості з погляду фізики процесів. Тому в наукових дослідженнях необхідно проаналізувати кожну з таких схем окремо. Виходячи з цього, об'єктом дослідження в статті є безконтактна вентиляльна система збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги (К Т-Т МН) за схемою в одну зірку. Схему силового електричного кола такої системи збудження зображено на рис. 1. З цього рисунку видно, що К Т-Т МН 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 розщеплені фазні гілки можуть мати потенціальне комбіноване з'єднання або можуть бути сполучені в один спільний вузол. Варіанти цих з'єднань визначають положенням ключа К. Коли ключ К розімкнений (ідентифікуємо такий його стан як $K=1$) – перший варіант, а коли ключ К замкнений ($K=2$) – другий. Статорні обмотки машин модулятора АМ1 та АМ2 живляться від двох трифазних джерел живлення Е1 та Е2, які мають взаємно протилежну послідовність фаз. Тут априорі приймається, що такими джерелами є акумуляторні батареї з керованими інверторами напруги.

© К.М. Василів

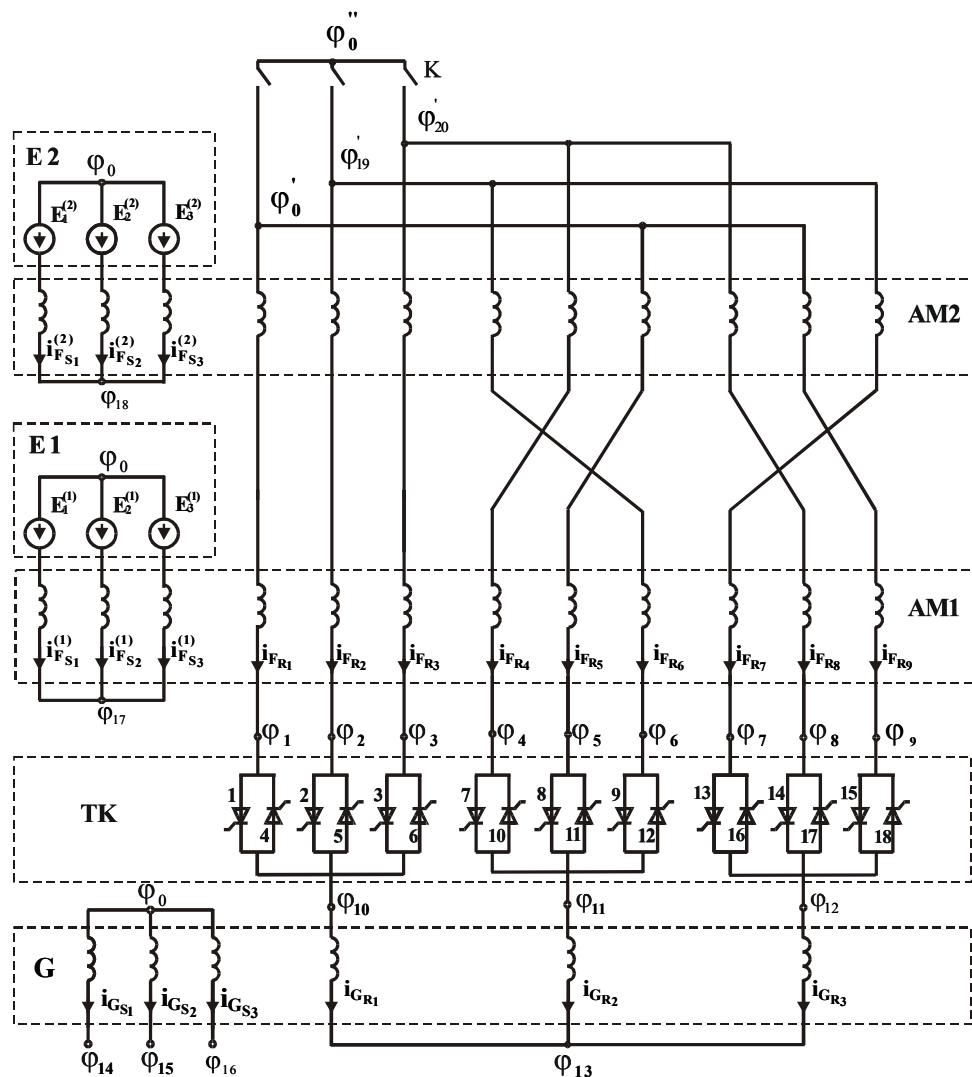


Рис. 1. Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора

До решти структурних елементів схеми (рис. 1) належать: ТК – тиристорний комутатор циклоконверторного типу з природною комутацією, яким слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ), G – асинхронізований генератор, яким слугує трифазна асинхронна машина з фазним ротором, обмотки фаз ротора якої з'єднані в зірку. Усі решта позначення на цій схемі є загальноприйнятими – літерами E, ϕ та i позначені електрорушійні сили, електричні потенціали в 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, а літерами S, R у нижніх індексах позначено належність координат до статора і ротора електричних машин, відповідно. Тиристри БТПЧ пронумеровані числами. Числами 1 та 2 в дужках у верхніх індексах позначено належність до першого E1 та другого E2 джерел живлення, відповідно.

На думку автора, з метою полегшення сприйняття основних положень матеріалу статті, логічним є лаконічно описати принцип роботи АСГ такого типу. Він ґрунтується на тому, що модулятор напруги шляхом додавання напруг і частот фазних гілок роторів машин модулятора формує сумарну напругу модульованої форми, частота заповнення якої пропорційна

частоті обертання роторів машин модулятора і кількості їх пар полюсів (ротори AM1 та AM2 розміщені на одному валі з АСГ), а частота модуляції визначається частотою двозонного ковзання. Послідовно з'єднаний з обмотками роторів машин модулятора комутатор циклоконверторного типу декодує модульовану напругу, внаслідок чого на його виході (на обмотці ротора генератора) утворюється система трифазних 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, теоретично частота напруги АСГ має дорівнювати частоті мереж живлення E1 та E2 асинхронних машин модулятора AM1 та AM2 і не залежати від частоти обертання ротора АСГ.

Аналіз публікацій та мета дослідження. Ідеологію генераторів стабільної частоти (ГСЧ) з безконтактною вентиляльною системою збудження на базі КМН започатковано в [3]. За збігом обставин питаннями наукового дослідження та розвитку автономних системи електроживлення (АСЕЖ) на базі АСГ з БВСЗ займається доволі вузьке коло науковців та інженерів, а тому вагома частка публікацій, спрямованих на дослідження зазначених систем електро-

живлення шляхом математичного моделювання належить автору цієї статті. Поява низки публікацій, спрямованих на розробку методів і математичних моделей, а також на вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в зазначених вище АСЕЖ, пояснюється наявністю в них різнотипних елементів – асинхронних машин та БТПЧ за низкою схем їх силових електричних кіл, а також наявністю системи керування комутатором та системи автоматичного керування окремими координатами (зокрема напругою), що спричинює складність електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цих АСЕЖ.

Однією з основних наукових праць, які стосуються дослідження АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ, є публікація [1]. Вона спрямована на розробку математичних моделей і відповідних програмних комплексів як засобу для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ за трифазно-трифазною схемою модулятора напруги. Математичні моделі і відповідні програмні комплекси дають змогу вивчати електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в автономній системі електроживлення під час роботи АСГ на типове навантаження, яким слугують: асинхронні двигуни, активно-індуктивне та активно-індуктивно-емісійне навантаження.

У публікації, які стосуються дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ вважається, що асинхронні машини модулятора напруги та генератора мають типову конструкцію. Виходячи саме з цього, діапазон двозонного ковзання, який забезпечує нормальну роботу АСЕЖ становить $S = -0,06 \div +0,06$. Це вказує на те, що загалом АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ є працездатною. Але такий діапазон ковзання розцінюється за надто вузьким, щоби стверджувати про достатні можливості для практичного застосування таких асинхронізованих генераторів в АСЕЖ. Тому дослідження продовжуються з метою досягнення розширення діапазону ковзання до меж, які б дали змогу практичного використання АСГ цього класу навіть в таких електроенергетичних установках як ВЕУ.

Враховуючи ту обставину, що працездатність АСГ з БВСЗ значною мірою визначається належною роботою комутатора, всю увагу слід сконцентрувати на процеси, які відбуваються саме в БВСЗ і її окремих структурних елементах, до яких належать машини модулятора, сам тиристорний комутатор та обмотка збудження АСГ (його роторна обмотка).

Першою працею, яка спрямована на вирішення такої проблеми, була публікація [2], яка стосується безконтактної системи збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою у дві зірки (коли кожна з фаз обмотки ротора генератора розщеплена на дві гілки, а утворені таким чином 6 гілок з'єднані у дві окремі трифазні зірки). У [2] розглянуто одну схему модулятора, в якій розщеплені фазні гілки роторів машин модулятора на вході з'єднані в один спільний вузол (для схеми рис. 1 це – $K=2$). За результатами дослідження [2] встановлено, що діапазон ковзання можливо розширити від

$S = -0,06$ до $S = +0,2$ шляхом збільшення співвідношення кількості витків обмотки статора до кількості витків обмотки ротора машин модулятора.

Враховуючи специфіку кожної із схем тиристорного комутатора і модулятора, однозначно очевидно є практична потреба в виконанні аналогічного дослідження безконтактної вентиляльної системи збудження АСГ на базі трифазно-трифазного каскадного модулятора напруги за схемою в одну зірку, характерним для якої є удвічі менша кількість тиристорів, аніж для схеми у дві зірки, що кваліфікується як перевага з погляду практичного застосування.

Таким чином, метою дослідження є встановлення закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентиляльній системі збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку на предмет можливості розширення робочого діапазону двозонного ковзання.

Виклад основного матеріалу. Результати попередніх досліджень [1, 2] вказують на те, що робота комутатора істотно визначається співвідношенням параметрів обмоток статорів і роторів машин модулятора. Великі значення параметрів роторів спричиняють інерційність електромагнітних процесів в колі модулятора і збуджувача генератора, внаслідок чого порушується нормальна робота комутатора, що унеможливило формування трифазної напруги частоти ковзання в обмотці ротора генератора, а отже, формування напруги стабільної частоти в обмотці статора АСГ.

З метою створення сприятливих умов роботи комутатора на підставі позитивного результату дослідження, отриманого в [2], запропоновано зменшити індуктивні опори роторних обмоток не лише машин модулятора, але й генератора шляхом збільшення співвідношення кількості витків обмоток статора і ротора (тобто, збільшенням їх коефіцієнтів трансформації). Перевірку впливу зміни коефіцієнтів трансформації на працездатність БВСЗ асинхронізованого генератора виконаємо аналізом функцій струмів і напруг фазних гілок роторів машин модулятора і генератора. Залежності струмів і напруг отримаємо шляхом розрахунку електромагнітних процесів БВСЗ рис. 1 за допомогою розроблених в [1] математичної моделі і програмного комплексу. Моделювання виконаємо для АСГ потужністю 100 кВт, вхідні дані якого мають такі значення: $L_{Gm} = 0,1$ Гн – робоча індуктивність (з боку статора); $L_{GS} = 0,005$ Гн – індуктивність розсіювання статора; $L_{GR} = 0,005$ Гн – приведена до обмотки статора індуктивність розсіювання обмотки ротора; $K_{Gi} = 10$ – коефіцієнт трансформації генератора; $P_{G0} = 2$ – кількість пар полюсів генератора; $R_{GS} = 0,01$ Ом – активний опір фаз обмотки статора; $R_{GR} = 0,05$ Ом – активний опір фаз обмотки ротора.

З метою уникнення переобтяження обсягом вхідних даних, для машин модулятора наведемо лише найважливіші дані, до яких належать: $K_i^{(1)}=20$ – коефіцієнт трансформації АМ1; $P_0^{(1)}=2$ – кількість пар полюсів АМ1; $K_i^{(2)}=20$ – коефіцієнт трансформації АМ2; $P_0^{(2)}=6$ – кількість пар полюсів АМ2.

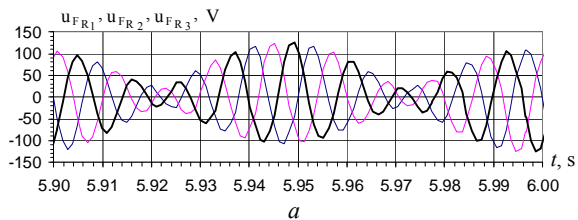
Принципово важливо зазначити, що відповідно до теорії АСГ з БВСЗ на базі каскадного модулятора напруги [3] для формування модульованої напруги частоти ковзання на виході модулятора співвідношення кількості пар полюсів генератора і машин модулятора має задовольняти таку умову:

$$(P_0^{(1)} + P_0^{(2)})/2 = 2 \cdot P_{G0}. \quad (1)$$

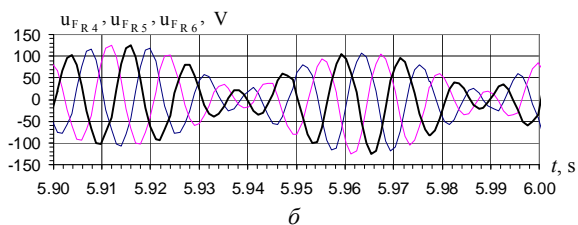
Наведені вище числові значення кількості пар полюсів генератора і асинхронних машин модулятора АМ1 та АМ2 задовольняють умову (1).

Згідно з [2] максимальне значення ковзання, при якому вдалося досягнути працездатності АСГ з БВСЗ на базі КМН дорівнює 0,2 ($S = +0,2$). Тому за орієнтир для дослідження роботи АСГ з безконтактною вентиляційною системою збудження за схемою в одну зірку візьмемо саме таке значення ковзання. Виходячи з цього, на початку дослідження розглянемо розрахункові залежності напруг та струмів фазних гілок обмоток роторів машин модулятора та фазних струмів обмотки ротора генератора для двох значень двозонного ковзання $S = -0,2$ та $S = +0,2$.

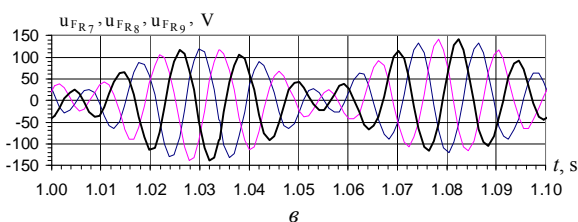
На рис. 2 зображено розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора.



($u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ – напруги I, II, III фазних гілок)



($u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ – напруги IV, V, VI фазних гілок)



($u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ – напруги VII, VIII, IX фазних гілок)

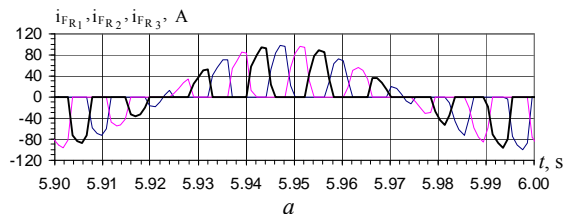
Рис. 2. Розрахункові залежності від часу миттєвих напруг фазних гілок роторів машин модулятора

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 роторів машин модулятора АМ1 та АМ2, які, своєю чергою, індукуються окремо для кожної з машин АМ1 та АМ2 струмами обмоток їх статорів. Аналогічно рис. 2, б ілюструє

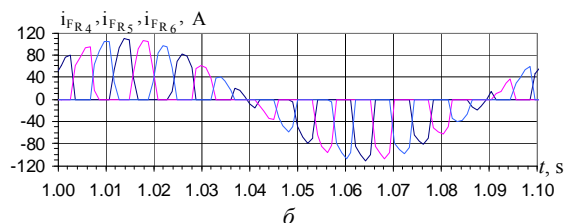
напруги $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ других трьох, а рис. 2,в – напруги $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ третіх трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (рис. 1).

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

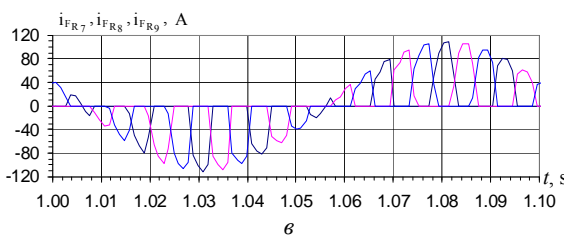
Для повнішого розуміння електромагнітних процесів, які відбуваються в системі збудження АСГ розглянемо криві миттєвих значень фазних струмів роторів машин модулятора. Їх зображено на рис. 3.



($i_{FR1}, i_{FR2}, i_{FR3}$ – струми I, II, III фазних гілок)



($i_{FR4}, i_{FR5}, i_{FR6}$ – струми IV, V, VI фазних гілок)



($i_{FR7}, i_{FR8}, i_{FR9}$ – струми VII, VIII, IX фазних гілок)

Рис. 3. Розрахункові залежності від часу миттєвих струмів фазних гілок роторів машин модулятора

Додатна півхвиля струмів на рис. 3,а формується тиристорами 1, 2, 3, а від'ємна – тиристорами 4, 5, 6 (див. схему на рис. 1). Аналогічним чином формуються струми двох інших груп фазних гілок рис. 3,б та рис. 3,в відповідно.

У контексті аналізу процесів, які відбуваються в БВСЗ АСГ принципово важливою інформацією слугує характер фазних напруг і струмів обмотки ротора генератора. Адже для отримання стабільної частоти напруги

обмотки статора генератора в обмотці ротора генератора має буди трифазна система струмів частоти ковзання. Тому розглянемо фазні струми обмотки ротора АСГ.

На рис. 4 зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів обмотки ротора асинхронізованого генератора для ковзання $S = +0,2$. З цього рисунку видно, що в обмотці ротора АСГ сформовані трифазні струми, форма яких є близькою до синусоїдної за частотою ковзання. Період цих струмів відповідає частоті ковзання ($S = +0,2$) і становить $T = 0,1$ с. Така форма струмів в обмотці ротора АСГ дає підставу очікувати, що частота фазних напруг обмотки статора буде дорівнювати частоті напруги в обмотках статора машин модулятора.

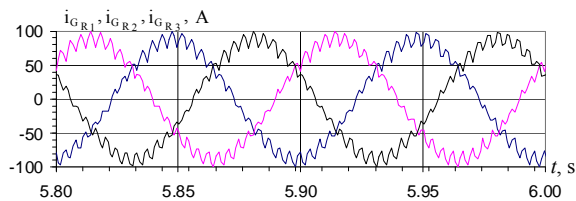


Рис. 4. Розрахункові залежності фазних струмів ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

Наведені вище результати моделювання, а також отримані результати досліджень, які не представлені тут, дають підставу стверджувати, що для ковзання АСГ, яке дорівнює плюс дві десяті ($S = +0,2$), його БВСЗ працездатна і забезпечує необхідну частоту напруги обмотки статора генератора, що і є предметом дослідження в цій публікації. А аналіз кривих напруг обмоток статора генератора становить предмет окремих досліджень з огляду на те, що на форму цих кривих впливають ще й інші чинники, які на тепер достатньо повно ще не вивчені, але з вже наявних результатів дослідження відомо, що вони змінюють гармонічний спектр фазних напруг генератора.

Для визначення крайньої межі робочого діапазону додатної зони ковзання асинхронізованого генератора з безконтактною вентиляльною системою збудження необхідно мати інформацію про характер струмів обмотки ротора генератора для інших, більших значень ковзання. Тому нижче наведемо розрахункові залежності цих струмів для низки значень додатного ковзання. Форма цих кривих дасть інформацію для розуміння закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентиляльній системі збудження асинхронізованого генератора і, як наслідок, дасть підставу для визначення крайнього допустимого робочого ковзання в його додатній області.

На рис. 5 зображено розрахункові залежності фазних струмів обмотки ротора генератора для ковзання $S = +0,5$.

З рис. 5 видно, що криві фазних струмів ротора генератора мають квазісинусоїдну форму з періодом основної гармоніки, який дорівнює $0,04$ ($T = 0,04$) секунди, що відповідає частоті ковзання $F_k = 25$ Гц ($F_k = 50 \cdot S = 50 \cdot 0,5 = 25$). Така форма кривих фазних струмів з чітко визначеною частотою також забезпечує стабільність частоти напруги генератора, а отже для ковзання $S = +0,5$ БВСЗ АСГ є працездатною.

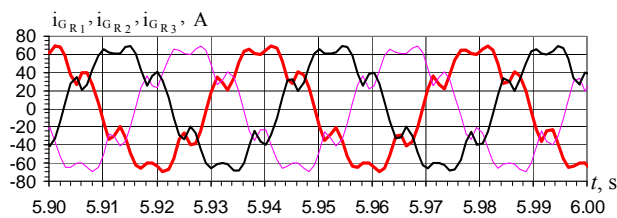


Рис. 5. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,5$

Подальше збільшення ковзання в додатній області призводить до зміни форми кривих фазних струмів, що видно з рис. 6 та рис. 7. На першому з них зображено розрахункові залежності фазних струмів обмотки ротора генератора для ковзання $S = +0,9$, а на другому – для ковзання $S = +0,95$. З цих рисунків видно, що фазні струми за формою не є синусоїдними. Натомість спостерігається тенденція до утворення системи напруг модульованої форми. Тому висновок є однозначним, його сутність полягає в тому, що для додатного ковзання, значення якого перевищує $S = +0,5$, БВСЗ АСГ втрачає працездатність. Таким чином, крайньою межею додатного діапазону робочого ковзання АСГ є ковзання зі значенням $S = +0,5$.

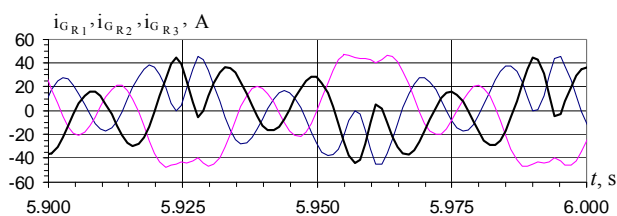


Рис. 6. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,9$

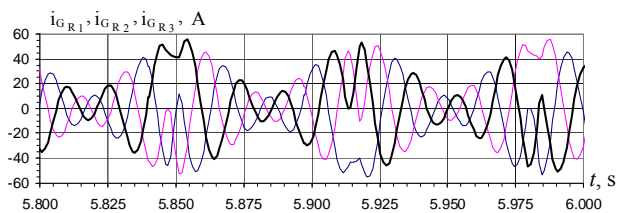


Рис. 7. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,95$

Як уже було зазначено, АСГ з БВСЗ на базі каскадного модулятора напруги може працювати в режимі двозонного ковзання. Адже збудження тут виконується з боку ротора, як у синхронній машині. Тому принципово важливо з'ясувати його функційні можливості для від'ємного діапазону ковзання. З цією метою також проведено дослідження для низки значень від'ємного ковзання.

На рис. 8 зображено розрахункові залежності фазних струмів ротора генератора для трьох значень ковзання: $S = -0,2$; $S = -0,8$ та $S = -1,0$. З рис. 8 виразно видно, що фазні струми ротора АСГ мають близьку до синусоїди форму з частотою основної гармоніки, яка дорівнює частоті ковзання. Це дає підставу стверджувати, що на відміну від додатної області ковзання, у від'ємній – БВСЗ працездатна в цілому її діапазоні від $S = 0$ до $S = -1,0$.

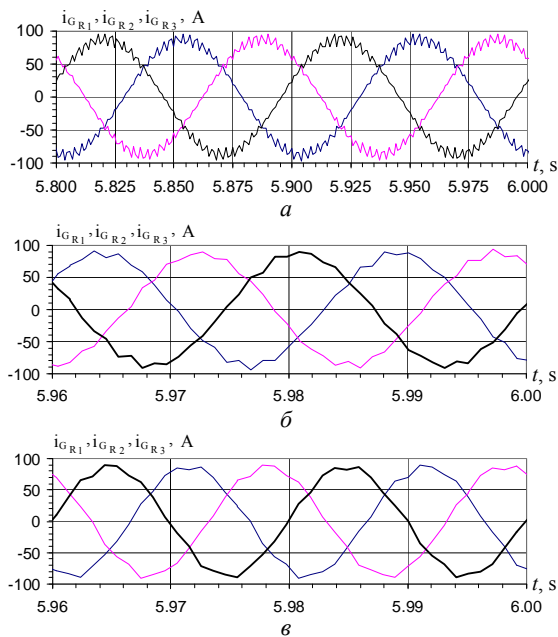


Рис. 8. Фазні струми ротора АСГ i_{GR1} , i_{GR2} , i_{GR3} (а – для $S = -0,2$; б – для $S = -0,8$; в – для $S = -1,0$)

На цьому етапі за допомогою розробленої в [1] математичної моделі і відповідного програмного коду виконано аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентильній системі збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку та встановлено закономірності їх перебігу на предмет впливу двозонного ковзання на працездатність асинхронізованого генератора.

У контексті перспективи досліджень з метою подальшого розвитку теорії асинхронізованих генераторів цього типу вбачається необхідним виконати аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються в таких генераторах на предмет впливу двозонного ковзання на якість напруги АСГ і за критерієм частоти, і за критерієм гармонічного спектру. Окрім цього, ставиться за мету виконати аналогічні дослідження для схеми модулятора зі спільним з'єднанням розщеплених фазних гілок обмоток роторів машин модулятора, коли ключ К замкнений (рис. 1) бо тут розглянуто схему з потенціальним комбінованим з'єднанням, коли ключ К розімкнений.

Висновки.

1. Вузкий діапазон робочого двозонного ковзання асинхронізованого генератора з безконтактною вентильною системою збудження на базі каскадного модулятора напруги за схемою в одну зірку, який на час останніх досліджень становив $\pm 0,06$, не дає змоги практичного застосування таких генераторів як автономних джерел електроживлення.

2. З метою вивчення можливостей розширення діапазону двозонного ковзання АСГ з БВСЗ виконано дослідження електромагнітних процесів, які відбуваються в цій системі збудження. На підставі проведених досліджень шляхом математичного моделювання за допомогою розроблених автором математичних моделей і програмного комплексу встановлені закономірності перебігу цих процесів залежно від значення двозонного ковзання.

3. Шляхом зміни параметрів роторів машин модулятора і АСГ через збільшення співвідношення кількості витків обмотки статора до обмотки ротора асинхронних машин модулятора і генератора досягнуто істотного розширення діапазону робочого ковзання асинхронізованого генератора.

4. Область від'ємного ковзання збільшено до значення $S = -1$, а область додатного – до $S = +0,5$.

5. Розширення діапазону робочого ковзання до вказаних меж створює реальні можливості для практичного впровадження генераторів цього класу в автономних системах електроживлення з широким діапазоном зміни частоти обертання ротора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // Технічна електродинаміка. – 2004. – №5. – С. 50-55.
2. Василів К.М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора за схемою у дві зірки на базі трифазно-трифазного модулятора напруги // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – №32(1204). – С. 48-52.
3. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербург. – 1997. – С. 182-192.

REFERENCES

1. Vasylyv K.M. Mathematical model of dynamic processes of an autonomous electric power system on the basis of contactless asynchronous generator with a three-phase-three-phase cascade modulated exciter. *Technical electrodynamic*, 2004, no.5, pp. 50-55. (Ukr).
2. Vasylyv K.M. Regularities of electromagnetic processes in the contactless excitation system of an asynchronous generator following a two-star scheme based on a threephase-three-phase voltage modulator. *Bulletin of NTU «KhpI»*, 2016, no.32(1204), pp. 48-52. (Ukr).
3. Galinovskiy A.M. Non-contact asynchronous generator with a modulated frequency converter. *Trudy I Mezhdunarodnoi (III Vserossiiskoi) konferentsii po Elektromekhanotronike* [Proceedings of the 1st International (III All-Russian) Conference on Electromechanotronics]. St. Petersburg, 1997, pp. 182-192. (Rus).

Надійшла (received) 25.02.2018

Василів Карл Миколайович, д.т.н., проф.,
 Національний університет «Львівська політехніка»,
 79013, Львів, вул. С. Бандери, 28а,
 тел/phone +38 032 2226403, e-mail: karl.vasylyv@gmail.com

K.M. Vasylyv

Lviv Polytechnic National University,
 28a, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Regularities of electromagnetic processes of a contactless excitation system of an asynchronous generator based on a cascade three-phase-three-phase voltage modulator in a single-star circuit.

The regularities of electromagnetic processes occurring in a non-contact excitation system of an asynchronous generator based on a cascade three-phase – three-phase voltage modulator in a single-star circuit for the possibility of expanding the range of a two-zone slip of a generator are established. A method for correcting the parameters of the machines' rotors of modulator and generator is proposed which makes it possible to stabilize the operation of the switch for the slip range from minus one to plus five tenths with maintaining the performance of the asynchronous generator. References 3, figures 8.

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