

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ БЕЗКОНТАКТНОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА З КАСКАДНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ НА БАЗІ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА ЗІ СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ

© Василів К.М., Галіновський О.М., 2005

Проаналізовано динамічні електромагнітні процеси неробочого ходу асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем. Встановлено закономірності перебігу динамічних електромагнітних процесів залежно від двох можливих схем модулятора.

Research of dynamic electromagnetic processes of a asynchronous generator with a non – contact cascade modulated exciter natural commutation. The influence of the scheme modulator agitator, on the dynamic electromagnetic process was estimated.

Постановка проблеми. Сучасний стан електроенергетики характерний утвердженням досить стабільної тенденції впровадження у практику використання асинхронізованих генераторів (АСГ). Такі генератори дедалі частіше знаходять застосування як у потужних стаціонарних, так і у автономних електроенергетичних системах (АЕЕС). Аналіз науково-технічної літератури та принципів функціонування наявних АСГ показує, що одним з найефективніших варіантів створення таких систем генерування є системи на базі безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БКМЗ) [1]. АСГ на базі БКМЗ дають змогу вирішити складну проблему отримання високоякісної електроенергії за найважливішими параметрами, до яких належить стабільність частоти напруги при змінній швидкості обертання ротора та необхідний її гармонічний спектр.

Аналіз останніх досліджень. Автори цієї роботи протягом останніх років виконали значний обсяг робіт, пов'язаних з розробкою АСГ на базі БКМЗ та проведенням досліджень електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються у таких системах. При цьому важлива роль у дослідженнях відводиться саме математичному моделюванню. З метою забезпечення можливості дослідження процесів методом математичного експерименту автори розробили математичні моделі АСГ з БКМЗ, а також математичні моделі АЕЕС на базі цих генераторів для всіх можливих типосхем збуджувача. На першому етапі були створені математичні моделі, що давали змогу досліджувати стаціонарні електромагнітні процеси (для стабільної швидкості обертання ротора генератора). У [2, 3] розроблено математичну модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ та відповідно математичну модель аналогічної автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним БКМЗ. Враховуючи орієнтованість АСГ з БКМЗ на їх використання саме у АЕЕС, подальші роботи ведуться у напрямку розробки математичних моделей АСГ та на їх підґрунті АЕЕС, що давали б змогу досліджувати електромагнітні та електромеханічні процеси у динамічних режимах роботи. Так, у [4] розроблено математичну модель АЕЕС на базі АСГ з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем зі схемою збуджувача у дві зірки. А у [5] розроблено математичну модель безконтактного АСГ з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем на базі циклоконвертора зі схемою в одну зірку. Ці математичні моделі дають змогу виконати

всесторонні дослідження електромагнітних процесів, що відбуваються у зазначених системах генерування з врахуванням найважливіших чинників, що впливають на перебіг процесів як у стаціонарних, так і у динамічних режимах роботи.

Задачі досліджень. Як зрозуміло з [1–5] та низки інших публікацій, що розглядають та досліджують АСГ з БКМЗ, такі системи можуть формуватися за досить широким набором схем силового електричного кола збуджувачів. Існують два основні типи схем збуджувачів: трифазно-трифазні та двофазно-трифазні. Своєю чергою, кожен з цих двох типів схем розгалужується на окремі підтипи схем збуджувачів. Це – схеми з однією, двома зірками та схеми з мостовим циклоконвертором. При цьому для кожного з цих підтипів схем можливі ще подальші розгалуження, що утворюються різним з'єднанням розщеплених віток фаз модулятора. Таких розгалужень схем є два для збуджувача з однією зіркою та по три – для збуджувача з двома зірками і мостовою схемою комутатора.

Кожен з окреслених типів схем має свою відносну перевагу та недоліки. Для отримання повної інформації про поведінку таких систем генерування необхідно ретельно проаналізувати перебіг процесів, що відбуваються у згаданих системах для всіх видів схем. З цієї точки зору дослідження динамічних електромагнітних процесів, що відбуваються у АСГ на базі БКМЗ з однією зіркою, становить наукову та практичну зацікавленість. Враховуючи, що у літературних джерелах не висвітлено результатів таких досліджень, задача вивчення основних закономірностей перебігу динамічних електромагнітних процесів АСГ на базі БКМЗ з однією зіркою під час роботи генератора у режимі неробочого ходу (н.х.) є актуальною науковою проблемою та має практичну значущість.

Метою роботи є аналіз динамічних електромагнітних процесів АСГ на базі БКМЗ зі схемою в одну зірку. Предметом досліджень є вивчення впливу динаміки ковзання АСГ на якість напруги генератора за усіма найважливішими параметрами, серед яких – частота та гармонічний спектр.

Виклад основного матеріалу. Дослідження динамічних електромагнітних процесів неробочого ходу АСГ на базі БКМЗ зі схемою в одну зірку виконаємо за допомогою програмного комплексу, розробленого на підставі математичної моделі, опублікованої у [5]. Схема силового електричного кола такого генератора зображена на рис. 1. Структурними елементами асинхронізованого генератора є: трифазно-трифазний модулятор, що складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2 з розщепленими на три вітки обмотками роторів і мереж живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти БТПЧ; генератор АГ, яким є асинхронна машина (АМ) із з'єднаними в одну зірку фазними обмотками ротора. Розщеплені вітки роторів машин модулятора АМ1 та АМ2 з'єднані між собою послідовно. Обмотка статора генератора вважається розімкненою.

На схемі рис. 1 прийняті такі позначення: буквами ϕ, i, E позначено потенціали, струми та електрорушійні сили, а буквою K позначено ключі схеми. Буквами F та G у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до модулятора та генератора. Буквами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора машин (АМ1, АМ2 та АГ). Цифрами у нижніх індексах позначено номери електричних віток у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 у нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами у круглих дужках (1) тощо у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2. Кількість штрихів у верхньому індексі відповідає номеру варіанта з'єднань розщеплених віток обмоток ротора АМ2.

У схемі модулятора передбачено два варіанти з'єднання розщеплених віток фаз роторних обмоток АМ2. Перший з них забезпечує комбіноване з'єднання ($K_F = 1$), коли ключ K – розімкнений. При цьому у схемі з'являються три вузли з потенціалами: $\phi_0', \phi_{17}', \phi_{18}'$. Приймаємо $\phi_0' = 0$. У другому варіанті ($K_F = 2$) передбачено з'єднання всіх розщеплених віток обмоток ротора АМ2 в один спільний вузол з нульовим потенціалом $\phi_0'' = 0$, тобто ключ K є замкнений.

Перебіг динамічних електромагнітних процесів АСГ істотно залежить від схеми силового електричного кола модулятора та збуджувача. Але принципово відрізняються процеси для модулятора з однаковою та різною кількістю пар полюсів машин модулятора (АМ1 та АМ2).

Важливо зазначити, що тут розглядається БКМЗ з різною кількістю пар полюсів машин модулятора АМ1 та АМ2 ($p_0^{(1)} = 4$ та $p_0^{(2)} = 8$) відповідно, а для генератора $p_{G_0}^{(1)} = 2$. Звертаємо увагу на те, що процеси при $p_0^{(1)} = p_0^{(2)}$ принципово відрізняються від тих, які протікають при $p_0^{(1)} \neq p_0^{(2)}$, і аналіз процесів при такому співвідношенні кількості пар полюсів є предметом окремих досліджень.

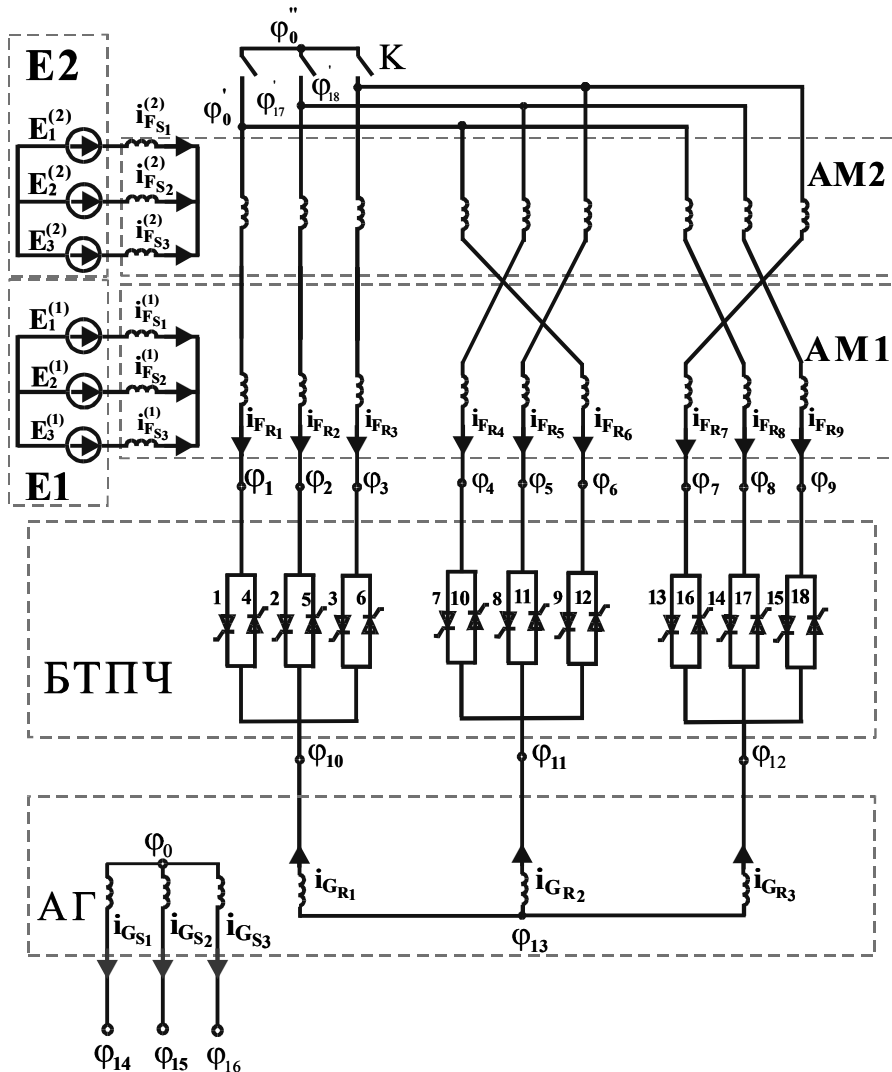


Рис. 1. Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора з БКМЗ

Дослідження динамічних електромагнітних процесів неробочого ходу проведемо для АСГ потужністю 100 кВт. Суть дослідження полягає у розрахунку електромагнітних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей від часу миттєвих значень фазних струмів ротора та напруг статора генератора, а також виконання гармонічного аналізу шляхом розкладання кривих фазних напруг статора генератора у ряд Фур'є та подальшого аналізу отриманого спектра амплітуд гармонічних складових цих напруг.

Дослідження проведемо для апріорі відомого закону зміни у часі ковзання асг ($s=s(t)$), хоча на загал ковзання може розглядатися як цілком визначена функція електромагнітних та електромеханічних величин АЕЕС. Розрахунки електромагнітних процесів неробочого ходу АСГ відображені на рис. 2–21. На рис. 2 відображено розрахункову залежність ковзання генератора від часу. Як зрозуміло з

цієї залежності, ковзання охоплює як від'ємну, так і додатну області, а також існує дільниця, у межах якої числове значення ковзання дорівнює нулю, що цілком характерно для АСГ з БКМЗ.

Проаналізуємо результати розрахунку електромагнітних процесів неробочого ходу генератора для двох схем силового електричного кола модулятора. Як описано вище, ці стани ключа формально ідентифікуються числовим значенням ознаки k_f ($k_f=1$ або $k_f=2$).

Спочатку виконаємо розрахунки процесів для схеми модулятора, коли $k_f=1$. При цьому розглянемо режим, коли працює система автоматичного стабілізування напруги, у якій функціонує пропорційно-інтегральний регулятор. Результати розрахунку процесів для цієї схеми модулятора зображені на рис. 2–11.

На рис. 3 відображено розрахункові залежності $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ фазних струмів ротора генератора. Ці струми є достатньо важливим показником, оскільки слугують еквівалентом намагнічувальних сил генератора і значною мірою визначають картину магнітного поля генератора. На рис. 4 відображено u_{GS}^v, i_{GR}^v – розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг статора (крива 1) та фазних струмів ротора генератора (крива 2).

Як бачимо з рис. 3, частота фазних струмів ротора генератора строго пропорційна до значення ковзання. На дільниці з проміжком часу $t=3-5$ с частота струму дорівнює нулю, а у точці зміни знака ковзання спостерігається зміна полярності струмів, що цілком відповідає фізиці електромагнітних процесів цього типу систем. Саме наявність струмів частоти ковзання забезпечує стабільність швидкості обертового поля стосовно обмотки статора, що, своєю чергою, забезпечує стабільну частоту фазної напруги генератора.

Графік $u_{GS}^v = u_{GS}^v(t)$ (крива 1 на рис. 4) відображає амплітуду фазної напруги ротора генератора. Як зрозуміло з цього рисунка, амплітуда фазних напруг статора генератора є стабільною, незважаючи на істотну динаміку швидкості обертання ротора.

Для аналізу електромагнітних процесів найбільшу зацікавленість становлять моменти часу, у яких ковзання є змінним. Тому для кількісного аналізу якості фазної напруги статора генератора використано розрахункові залежності миттєвих значень фазних напруг статора генератора, отриманих шляхом розрахунку процесів у околі точок для моментів часу $t=2,5; 3,0; 5,0; 5,5; 6,0; 7,0$ та $7,5$ с. Миттєві значення $u_{GS1}, u_{GS2}, u_{GS3}$ розрахункових залежностей фазних напруг статора генератора та u_{GS}^v – модуля зображувального вектора цих напруг для зазначених вище моментів часу відповідно відображені на рис. 5–11.

Як бачимо з цих рисунків, частота фазних напруг становить чітко 50 Гц для цілого діапазону розрахунків процесів ($t = 0 - 9$ с). При цьому, як це ілюструє ще й рис. 4, амплітуда напруг теж залишається чітко стабільною і дорівнює значенню, близькому до заданого, що становить 311 В. Криві фазних напруг на цих рисунках дають змогу візуально на якісному рівні оцінити якість напруг. Як бачимо, найвища якість фазних напруг досягається для ковзання з нульовим значенням (рис. 6 та 7). З характеру кривих напруг зрозуміло, що у спектрі цих напруг наявні деякі вищі гармонічні складові. Для кількісного аналізу гармонічного спектра фазних напруг розкладемо у ряд Фур'є миттєві значення фазних напруг на періоді за частотою напруги $f = 50$ Гц ($T = 0,02$ с), що охоплює точки з зазначеними вище моментами часу.

Результати гармонічного аналізу ілюструють табл. 1 та 2. У першому стовпці табл. 1 відображено номери гармонічних складових, включаючи нульову (постійну складову). В інших стовпцях – амплітуди напруг відповідних гармонічних складових. У табл. 2 відображені амплітуди гармонічних складових фазних напруг у відсотках до значення першої гармоніки.

З табл. 1 добре бачимо, що форма кривих фазних напруг на рис. 5–11 та значення даних таблиці є взаємно відповідними. Так, форму, найближчу до ідеальної синусоїди, мають криві на рис. 7. І амплітуди гармонічних складових напруг для моменту часу в околі точки $t = 5$ с, що відображені у 4-му стовпці, є найменшими. У відсотках числові значення вищих гармонічних складових не перевищують 0,38 % від значення першої гармоніки. Форма кривих фазних напруг для інших моментів часу більшою мірою відмінна від ідеальних синусоїд. Така картина пояснюється наявністю вищих гармонічних

складових у спектрі цих напруг. З табл. 2 зрозуміло, що найбільші значення мають гармоніки з номерами 8, 9, 10, 11. 10-та гармонічна складова для моменту часу $t = 3,0$ с становить 2,52 % від першої гармонічної складової.

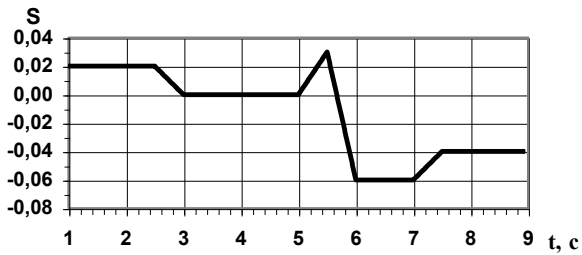


Рис. 2. S – ковзання генератора

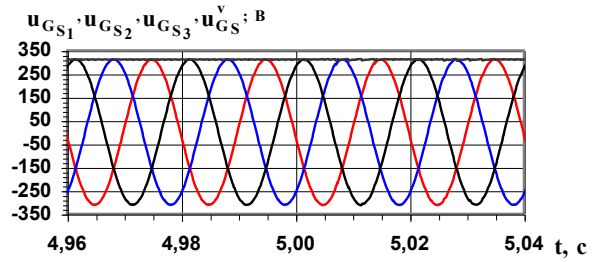


Рис. 7. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=5$ с

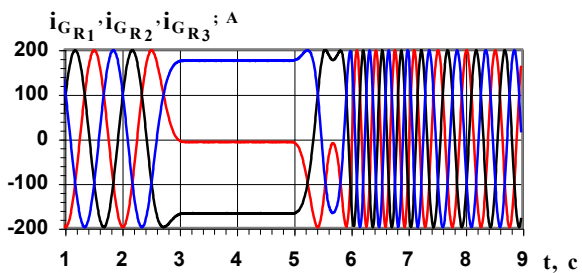


Рис. 3. $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – фазні струми ротора АСГ

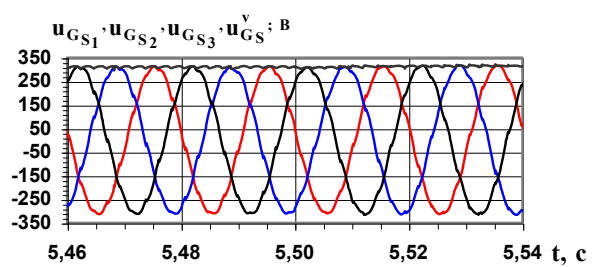


Рис. 8. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=5,5$ с

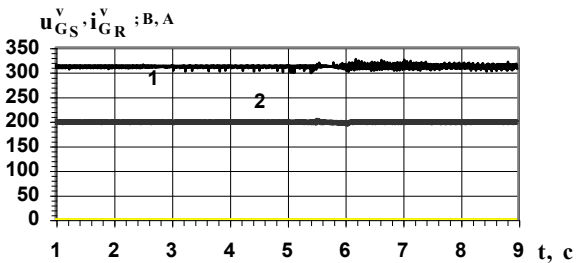


Рис. 4. u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображувальних векторів фазних напруг статора (кр. 1) та струмів ротора (кр. 2) АСГ

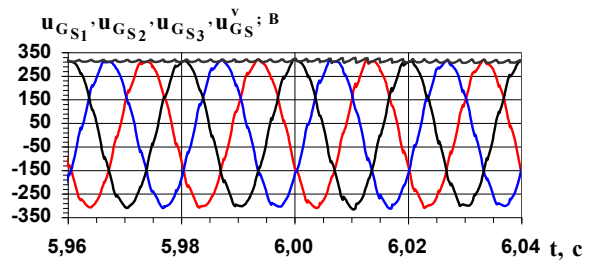


Рис. 9. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t = 6$ с

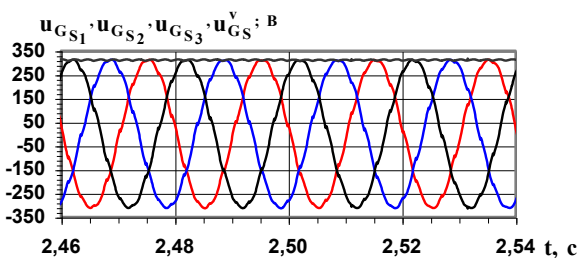


Рис. 5. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t = 2,5$ с

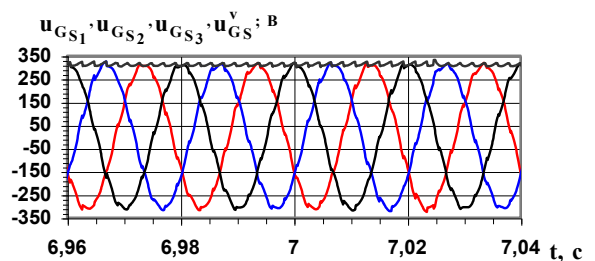


Рис. 10. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t = 7$ с

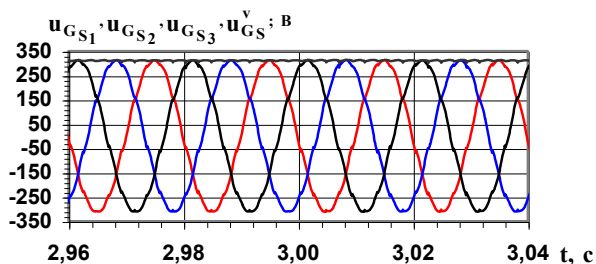


Рис. 6. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=3$ с

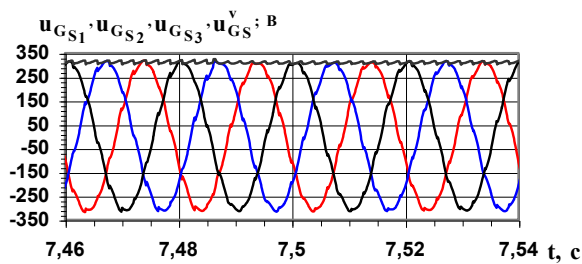


Рис. 11. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=7,5$ с

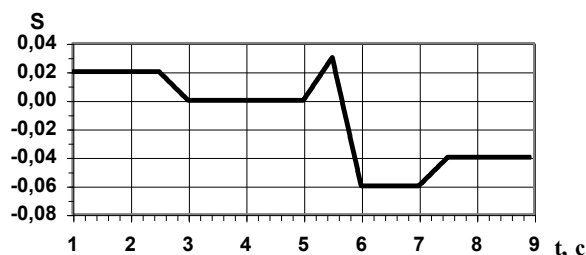


Рис. 12. S -ковзання генератора

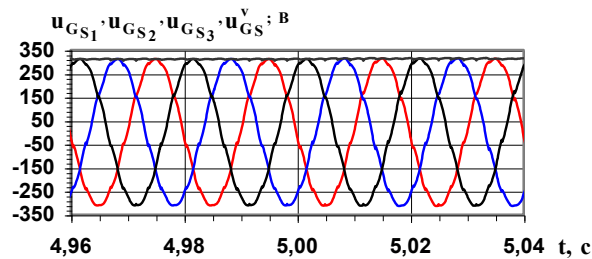


Рис. 17. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=5$ с

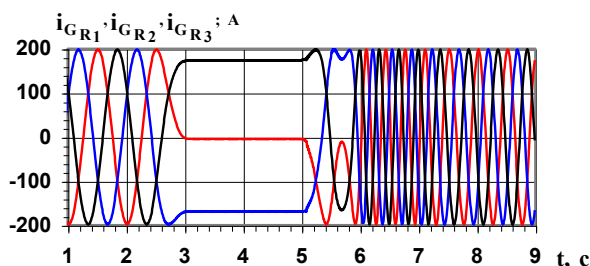


Рис. 13. $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ -фазні струми ротора АСГ

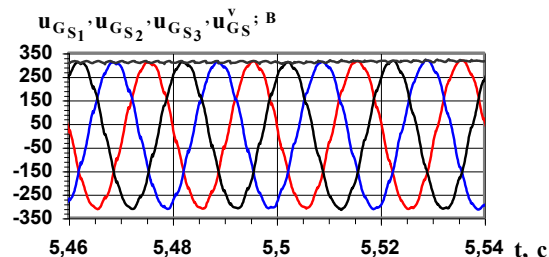


Рис. 18. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=5,5$ с

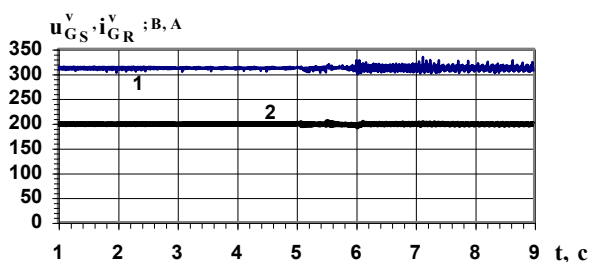


Рис. 14. u_{GS}^v, i_{GR}^v -модулі зображувальних векторів фазних напруг статора (кр. 1) та струмів ротора (кр. 2) АСГ

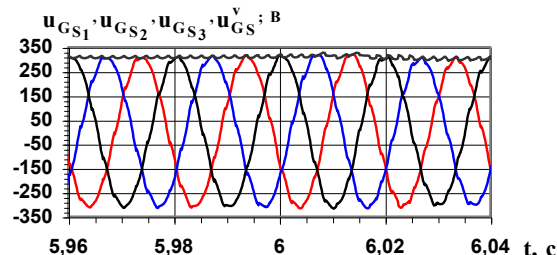


Рис. 19. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=6$ с

Загалом, як бачимо з рис. 2–11 та табл. 1 та 2, якість фазних напруг є високою. Система автоматичного регулювання з високою точністю забезпечує стабільність заданого значення амплітуди напруги, гармонічний спектр є цілком прийнятним, а найважливіше, що забезпечено стабільну частоту напруги за високої динаміки двозонного ковзання генератора.

Виконаємо аналогічне моделювання для другого варіанта силової схеми модулятора ($k_f=2$). Розрахункові залежності процесів для цього варіанта схеми модулятора відображені на рис. 12–21, а гармонічний аналіз у табл. 3 та 4. Як бачимо з цих рисунків та таблиць, гармонічний спектр

напруг дещо відрізняється від отриманих у попередньому варіанті більшими значеннями гармонік з номерами 8–11. Амплітуда напруг у попередньому варіанті дещо стабільніша. А за показником частоти напруги обидва варіанти схеми модулятора є однаково ефективними.

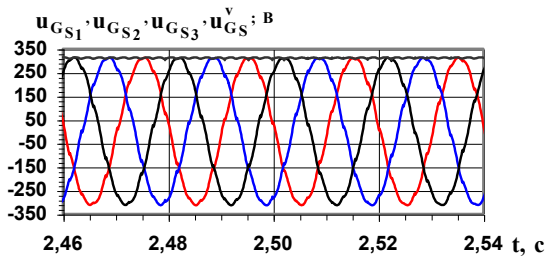


Рис. 15. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=2,5$ с

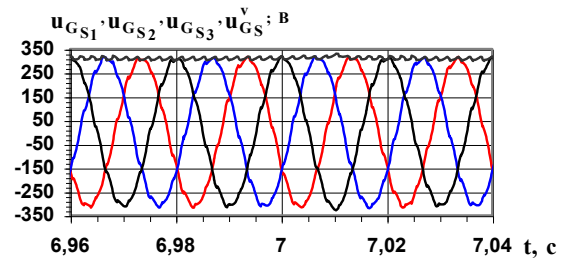


Рис. 20. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=7$ с

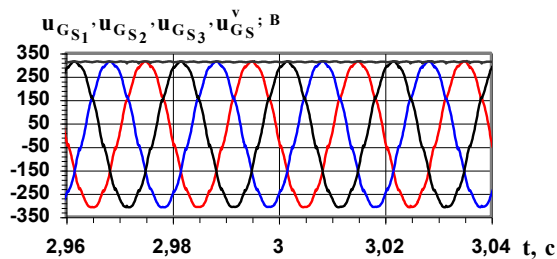


Рис. 16. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=3$ с

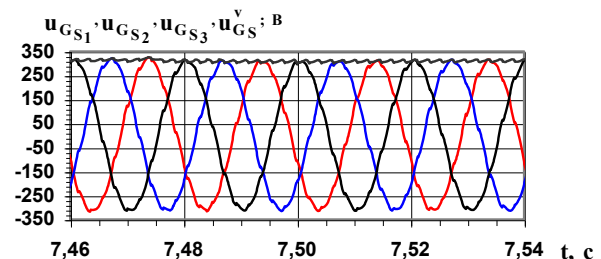


Рис. 21. Фазні напруги статора генератора та модуль їх зображувального вектора в околі точки $t=7,5$ с

Таблиця 1

Амплітуди гармонічних складових фазних напруг генератора у вольтах для схеми модулятора, коли $K_F = 1$

Номер гармоніки	Моменти часу, в околі яких виконано гармонічний аналіз фазних напруг статора генератора						
	$t = 2,5$	$t = 3$	$t = 5$	$t = 5,5$	$t = 6$	$t = 7$	$t = 7,5$
0	0.22	0.43	0.12	0.37	1.24	0.06	0.52
1	310.59	311.34	311.17	309.21	310.81	310.70	309.25
2	0.53	0.83	0.97	0.74	2.74	2.09	1.17
3	0.44	0.29	0.20	1.18	1.30	1.04	0.98
4	0.40	0.29	0.28	1.39	1.24	0.22	0.78
5	0.43	0.05	0.23	0.91	1.12	0.76	0.95
6	0.57	0.13	0.23	0.98	1.32	1.18	0.99
7	1.19	0.17	0.29	1.13	1.44	1.22	1.58
8	5.37	5.53	0.48	5.28	4.57	3.39	4.18
9	1.33	0.40	0.23	2.09	4.32	3.38	2.77
10	7.25	7.83	0.57	7.05	5.55	5.40	6.92
11	1.05	0.21	0.27	1.13	3.93	6.68	3.94
12	0.49	0.15	0.22	0.69	1.45	2.32	1.30
13	0.28	0.16	0.14	0.95	0.92	0.76	0.88
14	0.20	0.17	0.22	0.44	0.52	1.06	0.51
15	0.23	0.10	0.19	0.35	0.53	1.21	0.44
16	0.60	0.14	0.27	0.85	0.48	0.67	0.27
17	1.36	1.43	0.53	1.03	0.32	0.46	0.28
18	0.47	0.19	0.39	0.76	1.58	1.26	0.91

Таблиця 2

Амплітуди гармонічних складових фазних напруг генератора у відсотках до значення першої гармоніки для схеми модулятора, коли $K_F=1$

Номер гармоніки	Моменти часу, в околі яких виконано гармонічний аналіз фазних напруг статора генератора						
	t = 2,5	t = 3	t = 5	t = 5,5	t = 6	t = 7	t = 7,5
0	0.07	0.14	0.04	0.12	0.40	0.02	0.17
1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	0.17	0.27	0.31	0.24	0.88	0.67	0.38
3	0.14	0.09	0.06	0.38	0.42	0.33	0.32
4	0.13	0.09	0.09	0.45	0.40	0.07	0.25
5	0.14	0.02	0.07	0.29	0.36	0.25	0.31
6	0.18	0.04	0.07	0.32	0.42	0.38	0.32
7	0.38	0.06	0.09	0.37	0.46	0.39	0.51
8	1.73	1.78	0.15	1.71	1.47	1.09	1.35
9	0.43	0.13	0.07	0.67	1.39	1.09	0.89
10	2.33	2.52	0.18	2.28	1.78	1.74	2.24
11	0.34	0.07	0.09	0.37	1.26	2.15	1.28
12	0.16	0.05	0.07	0.22	0.47	0.75	0.42
13	0.09	0.05	0.05	0.31	0.30	0.25	0.28
14	0.06	0.05	0.07	0.14	0.17	0.34	0.16
15	0.07	0.03	0.06	0.11	0.17	0.39	0.14
16	0.19	0.05	0.09	0.28	0.16	0.22	0.09
17	0.44	0.46	0.17	0.33	0.10	0.15	0.09
18	0.15	0.06	0.13	0.25	0.51	0.41	0.29

Таблиця 3

Амплітуди гармонічних складових фазних напруг генератора у вольтах для схеми модулятора, коли $K_F=2$

Номер гармоніки	Моменти часу, в околі яких виконано гармонічний аналіз фазних напруг статора генератора						
	t = 2,5	t = 3	t = 5	t = 5,5	t = 6	t = 7	t = 7,5
0	0.09	0.26	0.1	0.26	1.05	1.05	0.67
1	310.6	310.84	310.86	309.47	310.13	314.26	308.82
2	0.23	0.65	0.34	1.05	1.34	5.09	1.09
3	0.28	0.17	0.2	1.22	0.93	1.98	0.47
4	0.24	0.48	0.56	0.78	0.92	1.54	0.29
5	0.38	0.19	0.18	0.58	1.07	1.78	0.31
6	0.55	0.15	0.2	0.89	1.41	0.97	0.5
7	0.98	0.21	0.18	1.34	2.05	1.36	0.97
8	5.15	5.67	5.84	5.5	4.7	4.06	4.03
9	1.34	0.2	0.2	2.19	4.43	3.83	2.97
10	7.72	7.46	7.32	6.8	4.76	5.01	6.43
11	1.17	0.08	0.25	1.35	4.01	5.84	4.18
12	0.77	0.14	0.2	0.41	1.14	1.89	1.78
13	0.66	0.13	0.26	0.52	0.73	1.21	1.22
14	0.52	0.14	0.22	0.58	0.59	0.85	0.95
15	0.52	0.11	0.2	0.41	0.49	0.67	0.79
16	0.72	0.11	0.23	0.89	0.38	0.55	0.7
17	1.32	1.53	1.47	0.97	0.3	0.55	0.65
18	1	0.14	0.21	0.79	1.64	1.47	1.05

**Амплітуди гармонічних складових фазних напруг генератора
у відсотках до значення першої гармоніки для схеми модулятора, коли $K_F=2$**

Номер гармоніки	Моменти часу, в околі яких виконано гармонічний аналіз фазних напруг статора генератора						
	t = 2,5	t = 3	t = 5	t = 5,5	t = 6	t = 7	t = 7,5
0	0.03	0.08	0.03	0.08	0.34	0.33	0.22
1	100	100	100	100	100	100	100
2	0.07	0.21	0.11	0.34	0.43	1.62	0.35
3	0.09	0.05	0.07	0.39	0.3	0.63	0.15
4	0.08	0.15	0.18	0.25	0.3	0.49	0.09
5	0.12	0.06	0.06	0.19	0.35	0.57	0.1
6	0.18	0.05	0.07	0.29	0.45	0.31	0.16
7	0.32	0.07	0.06	0.43	0.66	0.43	0.31
8	1.66	1.82	1.88	1.78	1.51	1.29	1.31
9	0.43	0.07	0.06	0.71	1.43	1.22	0.96
10	2.48	2.4	2.35	2.2	1.54	1.59	2.08
11	0.38	0.03	0.08	0.43	1.29	1.86	1.35
12	0.25	0.05	0.06	0.13	0.37	0.6	0.58
13	0.21	0.04	0.08	0.17	0.23	0.39	0.39
14	0.17	0.05	0.07	0.19	0.19	0.27	0.31
15	0.17	0.04	0.07	0.13	0.16	0.21	0.26
16	0.23	0.04	0.07	0.29	0.12	0.18	0.23
17	0.42	0.49	0.47	0.32	0.1	0.18	0.21
18	0.32	0.05	0.07	0.26	0.53	0.47	0.34

Для повноти досліджень динамічних електромагнітних процесів н.х. Порівняємо ці результати аналізу з подібними результатами, отриманими для схеми збуджувача АСГ у дві зірки. Ці дослідження опубліковані у [6]. З даних таблиці, наведеної у [6], максимальне значення вищих гармонічних складових фазних напруг у відсотках не перевищує 0,3, що вказує на те, що схема збуджувача у дві зірки функціонує стабільніше та забезпечує напругу вищої якості. Крім того, струм збудження для схеми у дві зірки менший у 2 рази, що сприяє зменшенню втрат.

Висновки: 1. Розрахунки динамічних електромагнітних та електромеханічних процесів у режимі неробочого ходу АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ на базі циклоконвертора зі схемою в одну зірку підтверджують працездатність систем генерування цього класу для достатньо широкого діапазону зміни ковзання генератора, враховуючи інтенсивну динаміку його зміни.

2. Обидва варіанти схем модулятора з комбінованим потенціальним розділенням та зі спільним нулем забезпечують цілком прийнятну для практики якість електричної напруги.

3. Значення та динаміка ковзання не має жодного впливу на частоту напруги генератора.

4. Системи генерування цього класу дають змогу отримати напругу стабільної частоти практично без вищих гармонічних складових за стабільної амплітуди навіть під час роботи в інтенсивних динамічних режимах.

1. Галиновский А.М. *Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты* // Тр. I Междунар. (III Всероссийской) конф. по электромехатронике. – СПб., 1997. – С. 182–192. 2. Василів К.М., Галіновський О.М. *Математична модель автономної електроенергетичної системи “асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів”* // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. *Електродинаміка*. – К: ІЕД НАН України, 2000. – С. 153–163. 3. Василів К.М. *Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем* // *Технічна електродинаміка*. – 2002. – № 6. – С. 31–37. 4. Василів К.М. *Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної*

системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // *Техн. електродинаміка*. – 2004. – № 5. – С. 51–55. 5. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель безконтактного асинхронізованого генератора з модульованим збуджувачем на базі трифазно-трифазного нульового циклоконвертора // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2003. – № 485. – С. 20–30. 6. Василів К.М. Математичне моделювання динамічних процесів неробочого ходу автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // *Технічна електродинаміка. Темат. вип.: Силова електроніка та енергоефективність*. – 2004. – Ч. 2. – С. 99–105.

УДК 621.313

В.М. Гладкий

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕМА

РОЗРАХУНОК СИЛИ ОДНОСТОРОННЬОГО МАГНІТНОГО ТЯЖІННЯ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ПРИ СТАТИЧНОМУ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТІ

© Гладкий В.М., 2005

На підставі розрахунку одновимірного магнітного поля з урахування вищих просторових гармонік магніторушійних сил та насичення основного магнітного кола обчислено силу одностороннього магнітного тяжіння в асинхронному двигуні при статичному ексцентриситеті. Наведено результати математичних експериментів.

The unbalanced magnetic pull in asynchronous motor having static rotor eccentricity has been calculated. The pull was computed on the base of one-dimensional magnetic field distribution taking into account spatial harmonics of MMF and magnetic core saturation. The results of mathematical experiments are presented.

Постановка проблеми. Під час проектування електричних машин обчислюють прогин вала, однією з причин якого є одностороннє магнітне тяжіння, спричинене зміщенням осі ротора відносно осі статора, або, інакше кажучи, ексцентриситетом ротора.

Причини виникнення ексцентриситету переважно технологічні: неточне встановлення ротора щодо статора, спрацювання підшипників тощо. Уникнути ексцентриситету практично неможливо, тому дослідженню його впливу на параметри, статичні характеристики, поведінку машини у перехідних процесах приділяється значна увага. Особливо це стосується асинхронних двигунів, які мають порівняно малий повітряний проміжок. На сьогодні відомо, що ексцентриситет ротора зумовлює підвищені вібрації ротора, шуми, зменшення критичної швидкості обертання вала.

Розрізняють ексцентриситет статичний і динамічний. За статичного ексцентриситету положення мінімуму величини повітряного проміжку є незмінним у просторі, за динамічного – вісь обертання вала обертається навколо осі статора.

Аналіз останніх досліджень. Проведений аналіз літератури свідчить, що під час розрахунку одностороннього магнітного тяжіння такі визначальні чинники, які істотно впливають на поведінку машини в усталених чи перехідних режимах, як насичення основного магнітного кола та вищі просторові гармоніки магніторушійних сил, враховуються або поодинокі [1, 7, 8], а якщо й у їхньому взаємозв'язку, то досить наближено [9].