

УДК 621.313.333

К.М. Василів

Український державний лісотехнічний університет, кафедри ОТ і МТП

**АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ
НЕРОБОЧОГО ХОДУ ГЕНЕРАТОРА СТАБІЛЬНОЇ ЧАСТОТИ
З БЕЗКОНТАКТНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ
НА БАЗІ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО
ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ**

© Василів К.М., 2002

За допомогою математичної моделі проведено дослідження електромагнітних процесів безконтактного модульованого збуджувача при роботі генератора стабільної частоти у неробочому ході. Встановлено вплив схеми модульованого збуджувача, ковзання генератора та значення вставки за струмом на перебіг електромагнітних процесів у безконтактному модульованому збуджувачі.

Research of electromagnetic processes of noncontact moduler agitator used by the generator of stable frequency in idle mation was carried out with the help of a mathematical model. The influence of the scheme modulator agitator, the delay of the generator and the digital value of the electricity supply on the electromagnetic process in a noncontact modular agitator was estimated.

Одним з перспективних способів забезпечення високого рівня найважливіших показників якості електроенергії (стабільності частоти і амплітуди напруги та прийнятного гармонічного складу напруги і струму) є формування генеруючих систем (ГС) на базі генераторів з безконтактними модульованими збуджувачами (БМЗ). Такі системи особливо ефективними є для автономного варіанта ГС (дизель-генераторів, вітроенергетичних та турбодетандерних установок). Найскладнішою проблемою для автономних ГС є забезпечення постійної частоти при змінній швидкості обертання рушія.

Робота у напрямку створення ГС з БМЗ проводиться тривалий час вченими кафедри електричних машин НТУУ “КПІ” у співпраці з автором статті. Результатом такої співпраці є розроблені автором цієї статті математичні моделі генератора стабільної частоти (ГСЧ) з БМЗ на базі трифазно-трифазного безпосереднього тиристорного перетворювача частоти (БТПЧ) [1, 2] та моделі ГСЧ на базі двофазно-трифазного БТПЧ [3, 4].

Самі генератори з БМЗ є досить складними системами, а процеси, що відбуваються у них, значною мірою залежає від багатьох факторів: схеми з'єднання та електромагнітних параметрів структурних елементів, параметрів режимів роботи генератора (як ковзання генератора, кута регулювання та вставки за струмом БТПЧ тощо).

З погляду режимів роботи актуальним є аналіз електромагнітних процесів генератора при його роботі в режимі неробочого ходу (н.х.), оскільки цей режим є невід'ємною складовою робочого циклу ГС, а сам н.х. є найважчим стосовно стійкості роботи БТПЧ і, як наслідок, БМЗ та генератора взагалі.

Завданням цієї статті є визначення основних закономірностей перебігу електромагнітних процесів н.х. генератора з БМЗ на базі трифазно-трифазного БТПЧ. Схема силового електричного кола такого генератора зображена на рис. 1, де АМ1, АМ2 – асинхронні машини; Е1, Е2 – джерела живлення БМЗ; БТПЧ – перетворювач частоти; АГ – генератор. Зміст решти позначень на схемі очевидний, тому їх опис не наводиться.

З рис. 1 видно, що у схемі збуджувача можливі три варіанти з'єднання, а у колі ротора генератора – два. Кожна конкретна схема ГСЧ визначається комбінацією відповідних станів ключів збуджувача та генератора. Для збуджувача передбачені такі стани ключів. Перший ($K_F = 1$), коли ключі $K_{F_1}, K_{F_2}, K_{F_3}$ розімкнені, а ключі K_{F_4}, K_{F_5} замкнені. Другий ($K_F = 2$) – ключі $K_{F_1}, K_{F_2}, K_{F_3}$ замкнені, а ключі K_{F_4}, K_{F_5} розімкнені. Третій варіант з'єднання ($K_F = 3$) ключі $K_{F_1}, K_{F_2}, K_{F_3}$ та K_{F_4}, K_{F_5} замкнені. Для обмоток ротора генератора передбачено два варіанти з'єднання. За першим ($K_G = 1$), коли ключі $K_{G_1}, K_{G_2}, K_{G_3}$ розімкнені, а ключі K_{G_4}, K_{G_5} замкнені, тобто розщеплені вітки обмоток ротора генератора утворюють дві зірки. Другий варіант ($K_G = 2$) передбачає ключі $K_{G_1}, K_{G_2}, K_{G_3}$ замкненими, а ключі K_{G_4}, K_{G_5} розімкненими, коли розщеплені вітки однойменних фаз ротора генератора з'єднані послідовно, а БТПЧ розпадається на три мостові схеми.

Електромагнітні процеси моделюються на комп'ютері за допомогою пакета програм, написаного за алгоритмом математичної моделі ГСЧ з БМЗ, опублікованої у [1], та у [2] як складової математичної моделі автономної електроенергетичної системи.

Якість напруги генератора визначається якістю струму ротора генератора $i_{GR_1} \div i_{GR_6}$. Тому кількісні і якісні параметри цього струму (його гармонічний спектр) приймаємо за один з основних критеріїв у оцінці протікання електромагнітних процесів та якості напруги генератора.

У статті аналізується перебіг електромагнітних процесів н.х. ГСЧ залежно від схеми з'єднання, ковзання генератора та параметрів режиму роботи БТПЧ (кута регулювання та вставки за струмом).

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

Дослідження шляхом математичного експерименту проведено для генератора потужністю 100 кВт. Суть дослідження полягає у розрахунку електромагнітних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей від часу миттєвих значень струмів та напруг і виконання гармонічного аналізу шляхом розкладання отриманих функцій у ряд Фур'є та подальшого аналізу спектра амплітуд гармонік струмів та напруг.

Одним з найважливіших факторів, що впливають на роботу генераторів з БМЗ є стан ключів, тобто електрична схема з'єднань розщеплених віток роторів збуджувача і генератора. Електрична схема істотно впливає на поведінку як збуджувача, так і через нього на генератор взагалі.

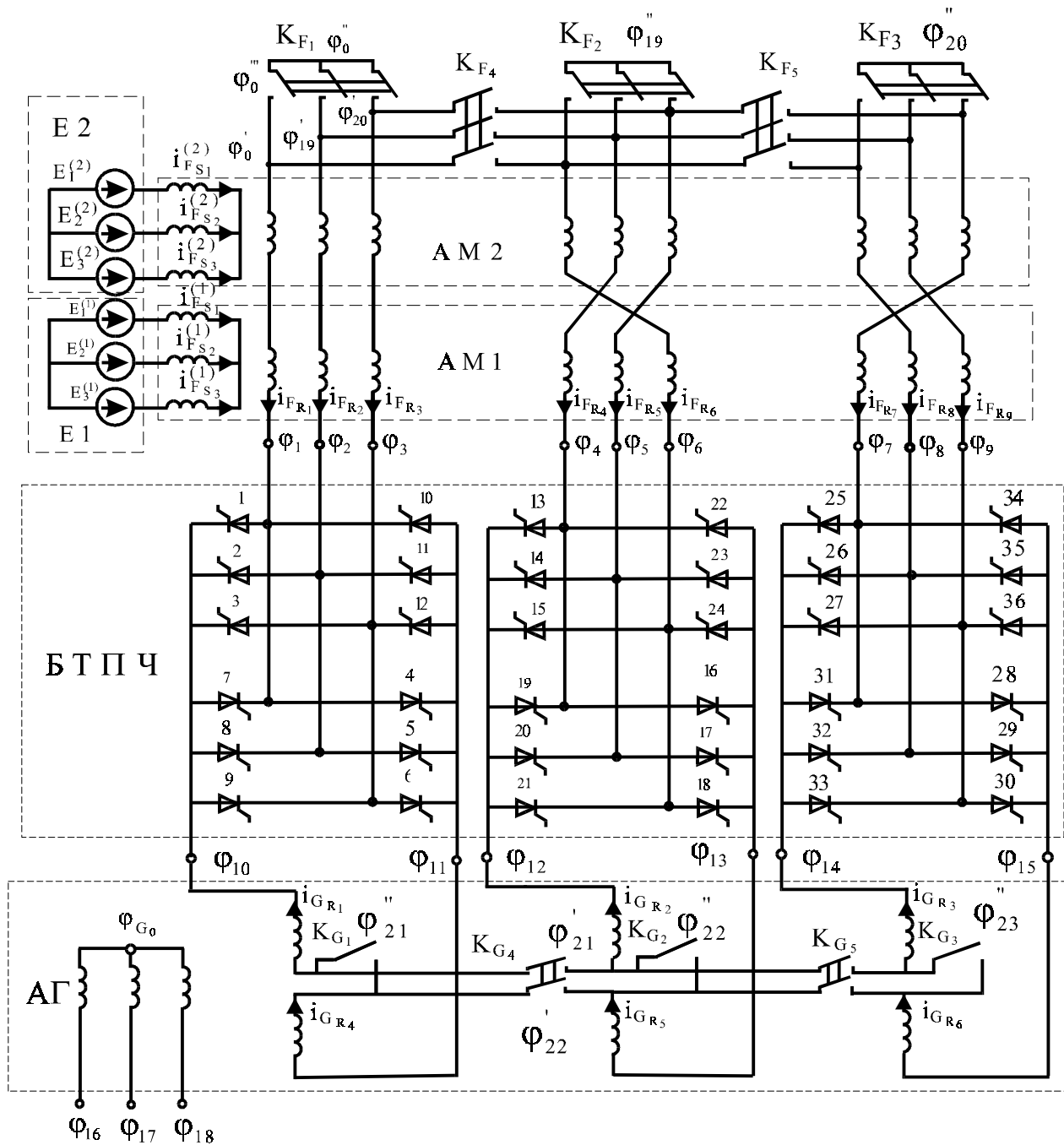


Рис. 1. Схема силового электричного кола ГСЧ з БМЗ на базі трифазно-трифазного БТПЧ

Проаналізуємо результати розрахунку електромагнітних процесів неробочого ходу генератора для таких схем: двох зірок на роторі генератора ($K_G = 1$), однієї зірки (друга зірка у математичній моделі вимикається шляхом запирання відповідних груп БТПЧ (див. схему рис. 1), а у реальній схемі її не існує) та мостової схеми ($K_G = 2$), коли розщеплені вітки однойменних фаз ротора генератора з'єднані послідовно. При цьому для кожної з цих схем виконується перебір всіх можливих станів ключів на роторі збуджувача ($K_F = 1, 2, 3$). Зауважимо, що для схеми з однією зіркою стан ключів збуджувача $K_F = 2$ випадає, оскільки він не забезпечує замикання електричного кола через обмотки роторів збуджувача та генератора і є неробочим.

Розрахунок проведемо для випадку розміщення розщеплених віток ротора генератора у одних і тих самих пазах, коли кут зсуву дорівнює нулю ($\alpha_G = 0^\circ$) та для випадку, коли кут зсуву між розщепленими вітками дорівнює 30 градусів ($\alpha_G = 30^\circ$).

На рис. 2 кривими 1, 2, 3 відповідно зображені розрахункові залежності струмів $i_{GR1}^{(1)}$, $i_{GR2}^{(2)}$, $i_{GR3}^{(3)}$ для $K_F = 1, 2, 3$ та кривою 4 струм $i_{GR2}^{(4)}$ для $K_F = 2$. Тут і далі у верхньому індексі цифрою у дужках позначено номер кривої, якою зображено залежності струмів та напруг на рисунку. Криві 1, 2, 3 отримані для вставки струму БТПЧ $h = 0,5$ А і кута регулювання $\alpha_p = -10^\circ$ при ковзанні $S = -0,02$. Як бачимо з рис. 2 (крива 2), схема зі станом ключів $K_F = 2$ не забезпечує необхідного режиму роботи збуджувача. Це проявляється у затяжному перехідному процесі та зменшенні амплітуди струмів фаз ротора генератора. Спричинений такий результат нестійкою роботою БТПЧ. Для отримання режиму близького до цих, які є для схем $K_F = 1$ та $K_F = 3$, для схеми $K_F = 2$ необхідно змінити параметри системи керування БТПЧ, зокрема, встановити значення вставки струму $h = 5$ А та збільшити випередження відкривання вентилів (встановити кут регулювання $\alpha_p = -20^\circ$). Залежність струму $i_{GR2}^{(4)}$ для цього режиму зображена на рис. 2 кривою 4. Зміна амплітуди струму по частоті заповнення (криві 1, 3) зумовлена взаємним впливом розщеплених віток ротора генератора через електромагнітний зв'язок між ними.

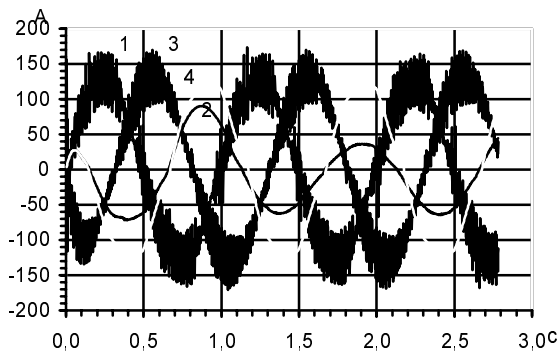


Рис. 2. Фазні струми розщеплених віток ротора генератора

$i_{GR1}^{(1)}$, $i_{GR2}^{(2)}$, $i_{GR3}^{(3)}$ (криві 1, 2, 3) для $K_F = 1$,
 $K_F = 2$, $K_F = 3$ та $i_{GR2}^{(4)}$ (крива 4)
 для $K_F = 2$ при $h = 5$ А і $\alpha_p = -20^\circ$

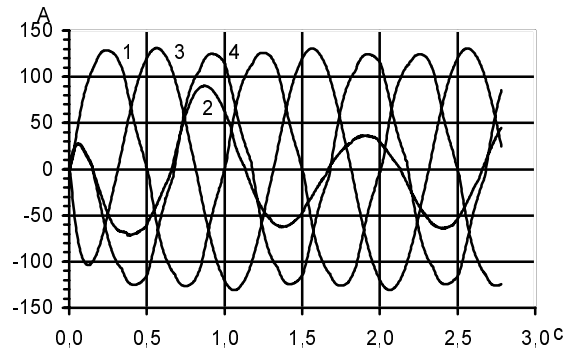


Рис. 3. Півсумарні струми розщеплених віток однойменних фаз ротора генератора

$i_{\mu 1}^{(1)}$, $i_{\mu 2}^{(2)}$, $i_{\mu 3}^{(3)}$ (криві 1, 2, 3) для $K_F = 1$, $K_F = 2$,
 $K_F = 3$ та $i_{\mu 2}^{(4)}$ (крива 4) для $K_F = 2$
 при $h = 5$ А та $\alpha_p = -20^\circ$

Для отримання гармонічного спектра кривих струмів рис. 2, їх функціональні залежності розкладені у ряд Фур'є на періоді $T = 1$ с. Саме таке значення періоду модуляції напруги ротора збуджувача спричинено ковзанням $S = -0,02$. Результати гармонічного аналізу струмів $i_{GR1}^{(1)}$, $i_{GR2}^{(2)}$, $i_{GR3}^{(3)}$ (криві 1, 4, 3) для рис. 2 наведені у табл. 1.

Амплітуди гармонік струмів для рис. 2

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{G_{R1}}^{(1)}$ ($K_F=1$, кр. 1)	0,20	130,89	0,14	0,17	0,15	0,45	0,40	0,26	0,14	0,16
$i_{G_{R2}}^{(4)}$ ($K_F=2$, кр. 4)	0,07	125,73	0,10	0,09	0,07	4,39	0,05	2,67	0,04	0,04
$i_{G_{R3}}^{(3)}$ ($K_F=3$, кр. 3)	1,13	126,36	1,25	0,48	0,48	4,62	1,15	1,32	0,86	0,43

Як бачимо з цієї таблиці, найвищу якість струмів ротора генератора забезпечує схема з'єднання з потенціальним комбінованим розділенням вузлів ($K_F = 1$). Саме для цієї схеми значення струмів першої гармоніки є найбільшим, а вищих гармонік практично не існує. Для двох схем $K_F = 2$ та $K_F = 3$ амплітуда 5-ї гармоніки досягає 3 % від першої, що теж є незначним і сумірним з похибкою обчислень.

На рис. 3 зображені розрахункові залежності півсум струмів розщеплених віток однойменних фаз ротора генератора $i_{\mu_1}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot (i_{G_{R1}}^{(1)} + i_{G_{R4}}^{(1)})$; $i_{\mu_2}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot (i_{G_{R2}}^{(2)} + i_{G_{R5}}^{(2)})$; $i_{\mu_3}^{(3)} = \frac{1}{2} \cdot (i_{G_{R3}}^{(3)} + i_{G_{R6}}^{(3)})$; $i_{\mu_2}^{(4)} = \frac{1}{2} \cdot (i_{G_{R2}}^{(4)} + i_{G_{R5}}^{(4)})$, які вважаємо важливим показником, бо вони є еквівалентом намагнічувальних сил обмотки ротора генератора. Як видно з рис. 3, ці криві є гладшими, оскільки по частоті заповнення струми розщеплених віток однойменних фаз обмотки ротора є у протифазі, тому їх півсума змінюється лише по частоті модуляції.

У табл. 2 відображені амплітуди гармонік кривих 1, 3, 4 струмів для рис. 3. З табл. 2 видно, що якість струмів i_{μ} теж найвища для схеми $K_F = 1$.

Амплітуди гармонік струмів для рис. 3

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{\mu_1}^{(1)}$ ($K_F=1$, кр.1)	0,01	130,79	0,02	0,00	0,00	0,44	0,01	0,38	0,01	0,00
$i_{\mu_2}^{(4)}$ ($K_F=2$, кр.4)	0,08	125,73	0,10	0,09	0,07	4,39	0,05	2,67	0,04	0,04
$i_{\mu_3}^{(3)}$ ($K_F=3$, кр.3)	0,92	126,40	0,94	0,45	0,68	4,98	0,65	2,02	0,26	0,25

На рис. 4 зображено розрахункові залежності модуля зображуючого вектора $i_{\mu}^{(v)}$ струмів i_{μ_1} , i_{μ_2} , i_{μ_3} та модуля зображуючого вектора $u_{G_S}^{(v)}$ напруг статора генератора $u_{G_{S1}}$, $u_{G_{S2}}$, $u_{G_{S3}}$.

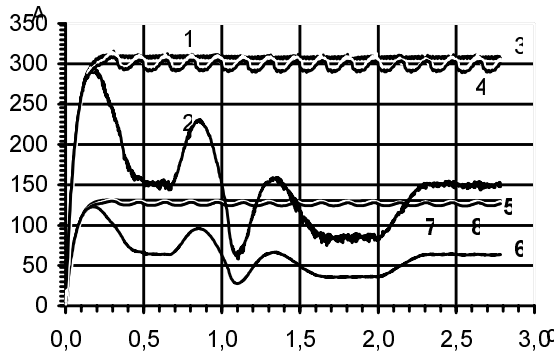


Рис. 4. Модулі зображуючих векторів фазних напруг статора генератора $u_{GS}^{(V)}$ (криві 1–4)

та струмів $i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, i_{\mu_3}$ (криві 5–8)

для $K_F=1, K_F=2, K_F=3$ та $K_F=2$

при $h = 5 A$ та $\alpha_p = -20^\circ$

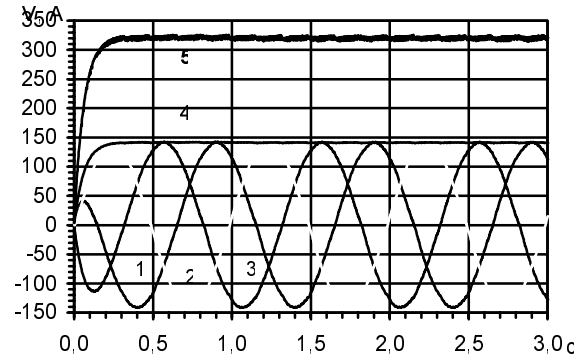


Рис. 5. Струми $i_{GR1}^{(1)}, i_{GR2}^{(2)}, i_{GR3}^{(3)}$ (криві 1–3),

модуль їх зображуючого вектора $i_{GR}^{(v)}$ (крива 4)

та модуль p зображуючого вектора $u_{GS}^{(V)}$

фазних напруг генератора (крива 5) для $K_F=1$

при зсунутих розщеплених вітках ротора

генератора на кут $\alpha_G = 30^\circ$

Гармонічний аналіз кривих вектора напруг та струмів для рис. 4 відображено відповідно у табл. 3 та 4. Найбільше значення нульової складової цих величин при найвищій якості їх гармонічного спектра забезпечує схема $K_F = 1$.

Таблиця 3

Амплітуди гармонік напруг для рис. 4

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=1$, кр. 1)	308,12	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,43	0,02	0,00	0,01
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=2$, кр. 4)	296,21	0,23	0,21	0,15	0,11	0,11	6,51	0,08	0,06	0,06
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=3$, кр. 3)	299,00	2,01	0,75	0,13	0,51	0,86	8,03	0,57	0,19	0,08

Таблиця 4

Амплітуди гармонік струмів для рис. 4

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{\mu}^{(V)}$ ($K_F=1$, кр. 5)	130,78	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,07	0,01	0,00	0,00
$i_{\mu}^{(V)}$ ($K_F=2$, кр. 8)	125,70	0,10	0,08	0,06	0,04	0,04	1,95	0,02	0,01	0,01
$i_{\mu}^{(V)}$ ($K_F=3$, кр. 7)	126,89	0,84	0,31	0,04	0,19	0,30	2,60	0,18	0,06	0,01

У математичній моделі генератора передбачена можливість розміщення розщеплених віток однойменних фаз ротора генератора у різних пазах (тобто зсуву розщеплених віток на визначений кут) з метою зменшення взаємного впливу через магнітний зв'язок.

На рис. 5 зображено струми $i_{G_{R1}}^{(1)}$, $i_{G_{R2}}^{(2)}$, $i_{G_{R3}}^{(3)}$ (криві 1–3), модуль їх зображуючого вектора $i_{G_R}^{(V)}$ (крива 4) та модуль зображуючого вектора $u_{G_S}^{(V)}$ фазних напруг статора генератора (крива 5) для $K_F = 1$ при зсунутих розщеплених вітках ротора генератора на кут $\alpha_G = 30^\circ$. Як бачимо з цього рисунка, якість струмів ротора генератора істотно поліпшилася порівняно з цими ж струмами без зсуву розщеплених віток (рис. 2, криві 1, 3).

Гармонічний аналіз струмів розщеплених віток ротора генератора та модулі зображуючих векторів струмів і напруг з рис. 5 відображений у табл. 5.

Таблиця 5

Амплітуди гармонік струмів та напруг для рис. 5

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{G_{R1}}^{(1)}$ ($K_F=1$, кр. 1)	0,01	141,11	0,19	0,13	0,09	0,83	0,02	0,74	0,56	0,14
$i_{G_R}^{(V)}$ ($K_F=1$, кр. 4)	141,04	0,05	0,02	0,03	0,02	0,01	0,33	0,01	0	0,01
$u_{G_S}^{(V)}$ ($K_F=1$, кр. 5)	321,06	0,12	0,03	0,14	0,09	0,03	0,93	0,03	0,06	0,42

Як зазначено вище, однією із можливих схем ГСЧ є схема, при якій фазні обмотки ротора генератора з'єднані між собою у одну зірку, а з обмоткою ротора збуджувача кожна з фаз генератора з'єднана через нульовий перетворювач частоти (стан ключів генератора $K_G = 1$).

У випадку першої робочої зірки в узагальненій матмоделі струми $i_{G_{R1}}$, $i_{G_{R2}}$, $i_{G_{R3}}$ збігаються зі струмами i_{μ_1} , i_{μ_2} , i_{μ_3} , а при робочій другій зірці струми i_{μ_1} , i_{μ_2} , i_{μ_3} збігаються зі струми $i_{G_{R4}}$, $i_{G_{R5}}$, $i_{G_{R6}}$.

На рис. 6 кривими 1 та 2 відповідно зображено струми $i_{G_{R1}}^{(1)}$ та $i_{G_{R3}}^{(3)}$.

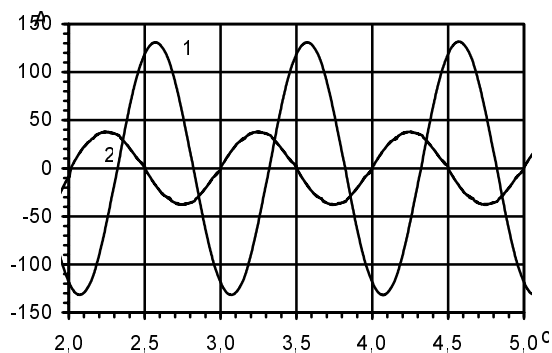


Рис. 6. Фазні струми ротора генератора $i_{G_{R1}}^{(1)}$, $i_{G_{R3}}^{(3)}$ (криві 1 та 2) для $K_F = 1$ та $K_F = 3$

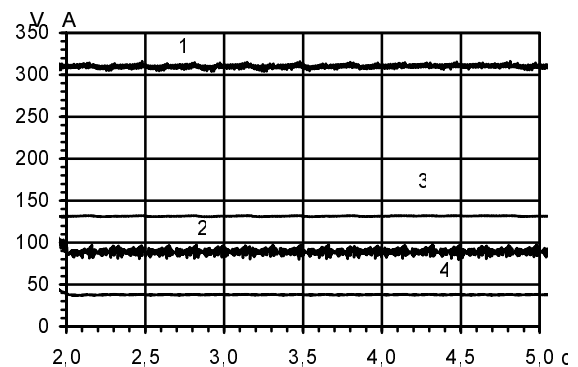


Рис. 7. Модулі зображуючих векторів фазних напруг статора генератора $u_{G_S}^{(V)}$ (криві 1, 2) та фазних струмів ротора генератора $i_{G_R}^{(V)}$ (криві 3, 4) для $K_F = 1$ та $K_F = 3$

Як бачимо з рис. 6, перше з'єднання ключів забезпечує більший струм, тому така схема є досконалішою. Гармонічний спектр цих струмів відображено у табл. 6. Порівнявши табл. 6 з табл. 1 та 2, бачимо, що якість струмів окремих розщеплених віток ротора генератора для схеми з двома зірками є практично такою ж, як у випадку однієї зірки. Сумарний струм розщеплених віток ротора генератора для двох зірок теж має близький спектр гармонік до струму при схемі з однією зіркою.

Таблиця 6

Амплітуди гармонік струмів для рис. 6

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{GR_1}^{(1)}$ ($K_F=1$, кр. 1)	0,04	131,76	0,10	0,07	0,07	0,44	0,01	0,31	0,01	0,02
$i_{GR_3}^{(3)}$ ($K_F=3$, кр. 2)	0,11	37,77	0,06	0,01	0,05	0,65	0,05	0,46	0,01	0,01

Модуль зображуючого вектора фазної напруги статора генератора $u_{G_S}^{(v)}$ та модуль зображуючого вектора струму ротора $i_{GR}^{(v)}$ генератора (криві 1, 2 та 3, 4 відповідно) зображені на рис. 7. Гармонічний аналіз кривих векторів напруг та струмів для рис. 7 відображено у табл. 7 та 8 відповідно.

Таблиця 7

Амплітуди гармонік напруг для рис. 7

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u_{G_S}^{(v)}$ ($K_F=1$, кр. 1)	310,46	0,26	0,35	0,31	0,18	0,15	0,59	0,07	0,08	0,07
$u_{G_S}^{(v)}$ ($K_F=3$, кр. 2)	89,19	0,15	0,06	0,01	0,04	0,06	0,76	0,04	0,03	0,03

Таблиця 8

Амплітуди гармонік струмів для рис. 7

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=1$, кр. 3)	131,74	0,11	0,15	0,13	0,07	0,06	0,15	0,03	0,03	0,03
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=3$, кр. 4)	37,83	0,06	0,02	0,00	0,01	0,02	0,20	0,01	0,01	0,01

Порівнявши дані табл. 3, 4 та 6, 7, очевидним є висновок про те, що, незважаючи на коливання струмів по частоті заповнення розщеплених віток, якість напруги для схем з двома зірками і однією зіркою при комбінованому потенціальному розділенні вузлів ($K_F = 1$) є досить близькою. При цьому для схеми з двома зірками маємо стійку роботу генератора для всіх трьох варіантів схем з'єднання розщеплених віток ротора збудувача.

Розглянемо мостову схему, коли $K_G = 2$. На рис. 8 кривими 1, 2, 3 зображено розрахункові залежності струмів i_{GR_1} , i_{GR_2} , i_{GR_3} для трьох станів ключів у колі ротора збудувача $K_F = 1$, $K_F = 2$ та $K_F = 3$ відповідно. У математичній моделі для мостової схеми струми i_{GR_1} , i_{GR_2} , i_{GR_3} збігаються зі струмами i_{GR_4} , i_{GR_5} , i_{GR_6} та i_{μ_1} , i_{μ_2} , i_{μ_3} .

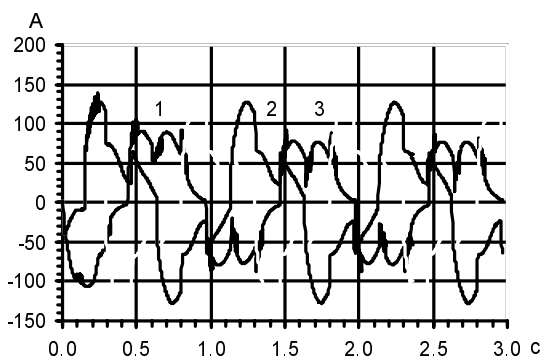


Рис. 8. Фазні струми ротора генератора $i_{GR1}^{(1)}$, $i_{GR2}^{(2)}$, $i_{GR3}^{(3)}$ (криві 1,2,3 відповідно для $K_F = 1$, $K_F = 2$, $K_F = 3$)

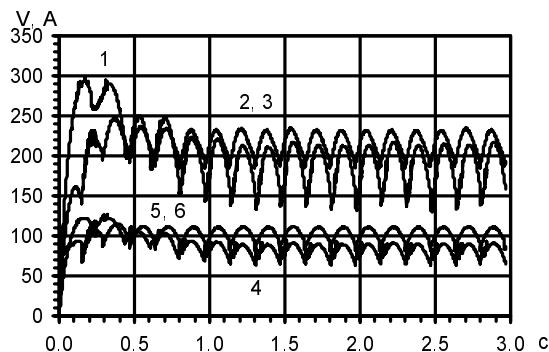


Рис. 9. Модулі зображуючих векторів фазних напруг статора генератора $u_{GS}^{(V)}$ (криві 1, 2, 3) та фазних струмів ротора генератора $i_{GR}^{(V)}$ (криві 4, 5, 6) для $K_F = 1$, $K_F = 2$ та $K_F = 3$

З рис. 8 видно, що якість струмів ротора генератора для мостової схеми БТПЧ є низькою, а для стану ключів збуджувача $K_F = 1$ ще й амплітуда становить лише 80 % від струму для інших двох станів ключів. Гармонічний аналіз кривих струмів для рис. 8 відображено у табл. 9. Як бачимо, амплітуди вищих гармонік (зокрема 3-ї для $K_F = 2$ та $K_F = 3$) становить близько 50 %, а амплітуда 9-ї – перевищує 10 % значення першої гармоніки).

Таблиця 9

Амплітуди гармонік струмів для рис. 8

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{GR1}^{(1)}$ ($K_F = 1$, кр.1)	0,46	78,34	0,37	15,59	0,48	14,30	0,56	4,39	0,07	8,88
$i_{GR2}^{(2)}$ ($K_F = 2$, кр.2)	0,07	91,09	0,21	44,41	0,12	6,94	0,33	4,65	0,18	10,29
$i_{GR3}^{(3)}$ ($K_F = 3$, кр.3)	0,36	91,60	0,38	44,64	0,40	6,64	0,44	4,34	0,15	10,43
№ гармоніки	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$i_{GR1}^{(1)}$ ($K_F = 1$, кр.1)	0,28	2,88	0,32	1,55	0,09	4,95	0,20	1,17	0,15	0,74
$i_{GR2}^{(2)}$ ($K_F = 2$, кр.2)	0,19	1,85	0,37	1,45	0,16	5,71	0,21	0,93	0,38	0,77
$i_{GR3}^{(3)}$ ($K_F = 3$, кр.3)	0,31	1,55	0,41	1,18	0,13	5,80	0,29	0,63	0,42	0,55

На рис. 9 кривими 1, 2, 3 та 4, 5, 6 відповідно зображено модулі зображуючих векторів напруги статора генератора $u_{GS}^{(v)}$ та струму ротора збуджувача $i_{GR}^{(v)}$. Криві 2, 3 та 5, 6 для станів $K_F = 2$ та $K_F = 3$ збігаються. Амплітуди гармонік модулів зображуючих векторів

напруг $u_{GS}^{(v)}$ для кривих 1, 2, 3 з рис. 9 відображені у табл. 10, а для функцій модулів зображуючих векторів струмів ротора генератора $i_{GR}^{(v)}$ криві 4, 5, 6 – у табл. 11.

Рис. 9 виразно ілюструє коливання амплітуд напруг (криві 1 і 2, 3) та струмів (криві 4 і 5, 6). Дані табл. 10 кількісно підтверджують наявність сильно виражених 6-ї та 12-ї гармонік модулів зображуючих векторів напруги ротора генератора, а дані табл. 11 ілюструють у кількісному відношенні наявність цих же гармонік для модуля зображуючого вектора струмів ротора генератора.

Таблиця 10

Амплітуди гармонік напруг для рис. 9

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=1$, кр.1)	187,50	1,72	1,49	2,00	0,91	0,91	32,47	0,21	0,65	0,62
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=2$, кр.2)	215,80	0,61	0,35	0,53	0,40	0,10	18,22	0,29	0,04	0,30
$u_{GS}^{(V)}$ ($K_F=3$, кр.3)	215,80	0,61	0,35	0,53	0,40	0,10	18,22	0,29	0,04	0,30
№ гармоніки	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_{GS}^{(v)}$ ($K_F=1$, кр.1)	0,23	0,43	7,75	0,38	0,30	0,19	0,11	0,45	3,41	0,29
$u_{GS}^{(v)}$ ($K_F=2$, кр.2)	0,23	0,07	3,87	0,18	0,09	0,24	0,14	0,11	2,07	0,11
$u_{GS}^{(v)}$ ($K_F=3$, кр.3)	0,23	0,07	3,87	0,18	0,09	0,24	0,14	0,11	2,07	0,11

Таблиця 11

Амплітуди гармонік струмів для рис. 9

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=1$ (кр.4))	82,10	0,68	0,62	0,77	0,36	0,31	8,93	0,11	0,19	0,12
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=2$ (кр.5))	102,56	0,20	0,13	0,17	0,13	0,05	10,20	0,11	0,02	0,12
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=3$ (кр.6))	102,56	0,20	0,13	0,17	0,13	0,05	10,20	0,11	0,02	0,12
№ Гармоніки	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=1$ (кр.4))	0,14	0,12	2,27	0,06	0,05	0,10	0,05	0,08	1,39	0,03
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=2$ (кр.5))	0,09	0,03	2,61	0,08	0,04	0,12	0,08	0,05	1,42	0,07
$i_{GR}^{(v)}$ ($K_F=3$ (кр.6))	0,09	0,03	2,61	0,08	0,04	0,12	0,08	0,05	1,42	0,07

З погляду практичного значення результатів дослідження, надзвичайно важливим є з'ясування впливу ковзання на якісні показники струмів ротора та напруги статора генератора. За результатами розрахунків електромагнітних процесів встановлено, що зміна значення ковзання у довільному діапазоні не має жодного впливу на частоту напруги.

Висновки

1. Оптимальним схемним рішенням для генератора з БМЗ на базі трифазно-трифазного тиристорного перетворювача частоти є з'єднання розщеплених віток обмотки ротора генератора у дві або одну зірку, а мостова схема для всіх трьох варіантів з'єднання у колі ротора збуджувача дає найнижчі показники якості напруги (найменше усереднене значення амплітуди та її коливання внаслідок наявності вищих гармонік з великим відсотковим значенням).

2. При розміщенні розщеплених віток обмоток ротора генератора у одних і тих же пазах, схеми з двома та однією зіркою забезпечують близькі за значенням показники якості напруги генератора. Для двох зірок прийнятну якість напруги забезпечують всі три варіанти з'єднання у колі ротора збуджувача, а для однієї зірки – лише перший з комбінованим потенціальним розділенням вузлів.

3. Істотний вплив на роботу БТПЧ, а значить генератора загалом, має розміщення розщеплених віток ротора генератора у різних пазах. Зокрема, при зсуві розщеплених віток ротора генератора на кут 30° істотно послаблюється їх взаємний магнітний вплив, що сприяє поліпшенню умов роботи вентилів БТПЧ і, як наслідок, забезпечується гладка форма струмів у обмотках ротора генератора при більшій амплітуді напруги статора генератора та порівняно вищій її якості.

4. Значення ковзання не має жодного впливу на частоту напруги генератора. Воно впливає лише на амплітуду, що підтверджує теоретичні засади, покладені в основу принципу функціонування ГСЧ. Підвищенню стійкості роботи комутатора та, як наслідок, підвищенню якості напруги генератора сприяє збільшення випередження кута регулювання БТПЧ до -30° та збільшення вставки струму перетворювача до $h = 10$ А.

1. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель генератора стабільної частоти на базі каскадного трипульсного електромашинного модулятора // Вісн. НУ "Львівська політехніка". – 2000. – № 403. – С. 11–20. 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 НАНУ. Електродинаміка. – К., 2000. – С. 153–163. 3. Василів К.М. Математична модель автономного асинхронного генератора з безконтактним модульованим збуджувачем на базі двопульсного перетворювача частоти // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". – 1999. – № 372. – С. 18–28. 4. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель електромеханічної системи "Асинхронний генератор з модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів" // Технічна електродинаміка. – К., 1998. – Спец. вип. 2. – Т. 2. – С. 66–71.