

гармоник и компенсация реактивной мощности в промышленных сетях, питающие выпрямители большой мощности // *Electrotechnika*. – 1977. – № 2. – С. 72–79. (переклад с угор.). 4. Xia D., Heydt G.T. Harmonic power flow studies. Part I, II // *IEEE Trans. on PAS*. – 1982. – Vol. 101, № 6. – P. 1257–1270. 5. Baghzouz Y., Tan O.T. Probabilistic modeling of power system harmonics // *IEEE Trans. on IA*. – 1987. – Vol. 23, № 1. – P. 173–180. 6. McGranaghan M.F., Dugan R.C., King T.A., Tewell W.T. Distribution feeder harmonic study methodology // *IEEE Trans. on PAS*. – 1984. – Vol. 103, № 12. – P. 3663–3670. 7. Варецький Ю.О., Бахор З.М., Равлик О.М. Розрахунок показників якості електроенергії у системі електропостачання тягових підстанцій відкритої копальні // Зб. праць III Міжнар. конф. «Ефективність і якість електро-постачання промислових підприємств». – Маріуполь, 1994, – С. 62–64. 8. Varetsky Y. Exploitative characteristics of static filter circuits // *Proc. of 5-th, Proc. of 6th Int. Conf. Electric power quality and utilization, Cracow, 2001*. – P. 297–302.

УДК 621.313.333

К.М. Василів

Український державний лісотехнічний університет,
кафедра ОТ і МТП

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ПРИ РОБОТІ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

© Василів К.М., 2003

За допомогою математичної моделі проведено дослідження електромагнітних процесів автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем при роботі на номінальне статичне навантаження. Встановлено закономірності впливу схеми модульованого збуджувача на перебіг електромагнітних процесів у збуджувачі та генераторі.

Research of electromagnetic processes of the noncontact modulated exciter during the work of the generator of stable frequency under nominal static load was carried out with the help of a mathematical model. Objective laws of the influence of the modulated exciter scheme, sliding of the generator, and insertion according to current on electromagnetic process procedure in the noncontact modulated exciter were established.

Постановка проблеми

Аналіз літератури свідчить, що на найближчий час важливим напрямком розвитку електроенергетики є розробка та впровадження у практику використання автономних електроенергетичних систем (АЕЕС). Ядром таких систем служать дизель-генератори, вітроенергетичні та газотурбінні установки. Характерною особливістю АЕЕС є істотна нестійкість обертання рушія (вітроколеса, дизеля, газотурбінного приводу), яка спричиняє

складну проблему – забезпечення постійності частоти та амплітуди напруги. Для автономних електроенергетичних систем актуальною також є проблема надійності роботи, вирішення якої вимагає уникнення використання контактних щіткових вузлів.

Аналіз останніх досліджень

Теоретичні наукові праці та технічні розробки останніх десятиліть показують, що одним з найефективніших і найперспективніших способів забезпечення стабільної частоти напруги при змінній швидкості обертання рушія є конструювання АЕЕС на базі генераторів з безконтактними модульованими збуджувачами (ГзБМЗ).

Значний внесок у розробку ГзБМЗ, як їх ще називають генератори стабільної частоти (ГСЧ), зроблено вченими кафедри електричних машин НТУУ “КПІ”. Тут розроблено основні теоретичні положення принципу функціонування цих генераторів та запропоновано їх нові схеми [1]. Принципово важливими особливостями ГСЧ є безконтактність систем збудження, виконаних на базі електромашинних модуляторів та безпосереднього вентиляного перетворювача частоти з природною комутацією. Концептуальними положеннями, на яких ґрунтується принцип функціонування БМЗ є комбінований спосіб керування тиристорами [2], формування відповідних електричних схем модулятора та інші, які забезпечують високу якість струму збудження генератора, що, у свою чергу, є принципово важливою передумовою для отримання якісної напруги.

Автором даної статті у співпраці з науковцями НТУУ “КПІ” розроблено та опублікована у [3, 4] математичні моделі АЕЕС на базі ГСЧ з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем. На підставі математичних моделей розроблено відповідні комплекси програмною мовою FORTRAN, за допомогою яких на комп’ютері отримано важливі теоретичні та практичні результати. Друга математична модель відрізняється від першої вищим рівнем адекватності моделювання тиристорного перетворювача частоти, що дозволило уникнути числової нестійкості під час інтегрування системи диференціальних рівнянь.

Задачі досліджень

Оскільки об’єкт дослідження (ГзБМЗ) належить до систем генерування нового типу, то на сьогодні у науково-технічній літературі практично відсутні публікації за результатами дослідження подібних систем.

Метою даної роботи є вивчення електромагнітних процесів, що відбуваються у АЕЕС, взагалі, і генераторі та збуджувачі, зокрема, при поетапному у часі ввімкненні двох споживачів з активно-індуктивним навантаженням. Предметом дослідження є оптимізування електричної схеми генератора та деяких параметрів керування комутатором (як кут регулювання), а також виконання гармонічного аналізу напруги та струму статора генератора.

З погляду практичних потреб актуальною задачею є вивчення електромагнітних процесів та встановлення їх закономірностей протікання у функціонально важливих режимах роботи АЕЕС. Такими важливими режимами роботи є режими неробочого ходу генератора, робота генератора на активно-індуктивне навантаження та робота системи при пусках асинхронних двигунів.

У [5] опубліковані результати досліджень електромагнітних процесів зазначеної АЕЕС при роботі генератора у режимі неробочого ходу. Встановлено основні закономірності протікання електромагнітних процесів залежно від схеми з’єднання, ковзання генератора та найважливіших параметрів системи керування БТПЧ (кута регулювання, вставки за

струмом), а також структури та параметрів системи автоматичного керування. У [6] опубліковані результати досліджень електромагнітних процесів подібної АЕЕС, створеної на базі генератора стабільної частоти з трифазно-двофазним безконтактним модульованим збуджувачем, при роботі у режимі неробочого ходу. У [7] опубліковані результати аналізу цієї ж системи при роботі генератора на активно-індуктивне навантаження.

Не менш важливий практичний інтерес становить вивчення поведінки АЕЕС на базі ГСЧ з трифазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем (ТТБМЗ) при роботі генератора на активно-індуктивне навантаження. Оскільки статичне навантаження для автономних систем є характерним, а відповідні процеси ще недостатньо вивчені, то зазначена проблема є актуальною.

Виклад основного матеріалу

Отже, об'єктом дослідження є АЕЕС на базі ГСЧ з ТТБМЗ. Схема силового електричного кола такої системи зображена на рис. 1. Структурними елементами цієї системи 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) з розщепленими на дві вітки обмотками ротора; три асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3 (за браком місця на схемі зображено лише перший та останній); активно-індуктивне навантаження Н; електрична мережа М, з якою генератор може працювати паралельно, та фільтр Ф.

На схемі рис. 1 прийняті такі позначення: буквами φ, i, E позначено потенціали, струми та електрорушійні сили, а буквою К позначено ключі схеми. Буквами: F, G, D, E, H, C у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до модулятора, генератора, асинхронних двигунів, мереж, активно-індуктивного навантаження та фільтра. Буквами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора (АМ1, АМ2, АГ, АД1, АД2, АД3). Цифрами у нижніх індексах позначено номери електричних віток у межах кожного із структурних елементів, цифрою 0 в нижньому індексі позначені вузли з нульовим потенціалом. Цифрами в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2, а також до асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3. Кількість штрихів у верхньому індексі відповідає номеру варіанта з'єднань розщеплених віток обмоток ротора АМ2.

У схемі модулятора передбачено три варіанти з'єднання роторних обмоток АМ2: перший з них забезпечує комбіноване з'єднання ($K_F=1$), коли ключі K_2 – розімкнені, а ключі K_1 – замкнені. При цьому у схемі з'являться три вузли з потенціалами: φ_0' , φ_{25}' , φ_{26}' . Приймаємо $\varphi_0'=0$. У другому варіанті розщеплені вітки роторних обмоток АМ2 з'єднані у три зірки ($K_F=2$), тобто ключі K_2 замкнені, а ключі K_1 розімкнені. При такому стані ключів з'являться також три вузли з потенціалами: φ_0'' , φ_{25}'' , φ_{26}'' , де також приймаємо, що $\varphi_0''=0$. Утворені вузли будуть розміщені по трьох фазних групах розщеплених віток. І останній, третій, варіант ($K_F=3$) передбачає з'єднання всіх віток обмоток ротора АМ2 у спільний вузол з нульовим потенціалом $\varphi_0'''=0$, тобто ключі K_1 та K_2 замкнені.

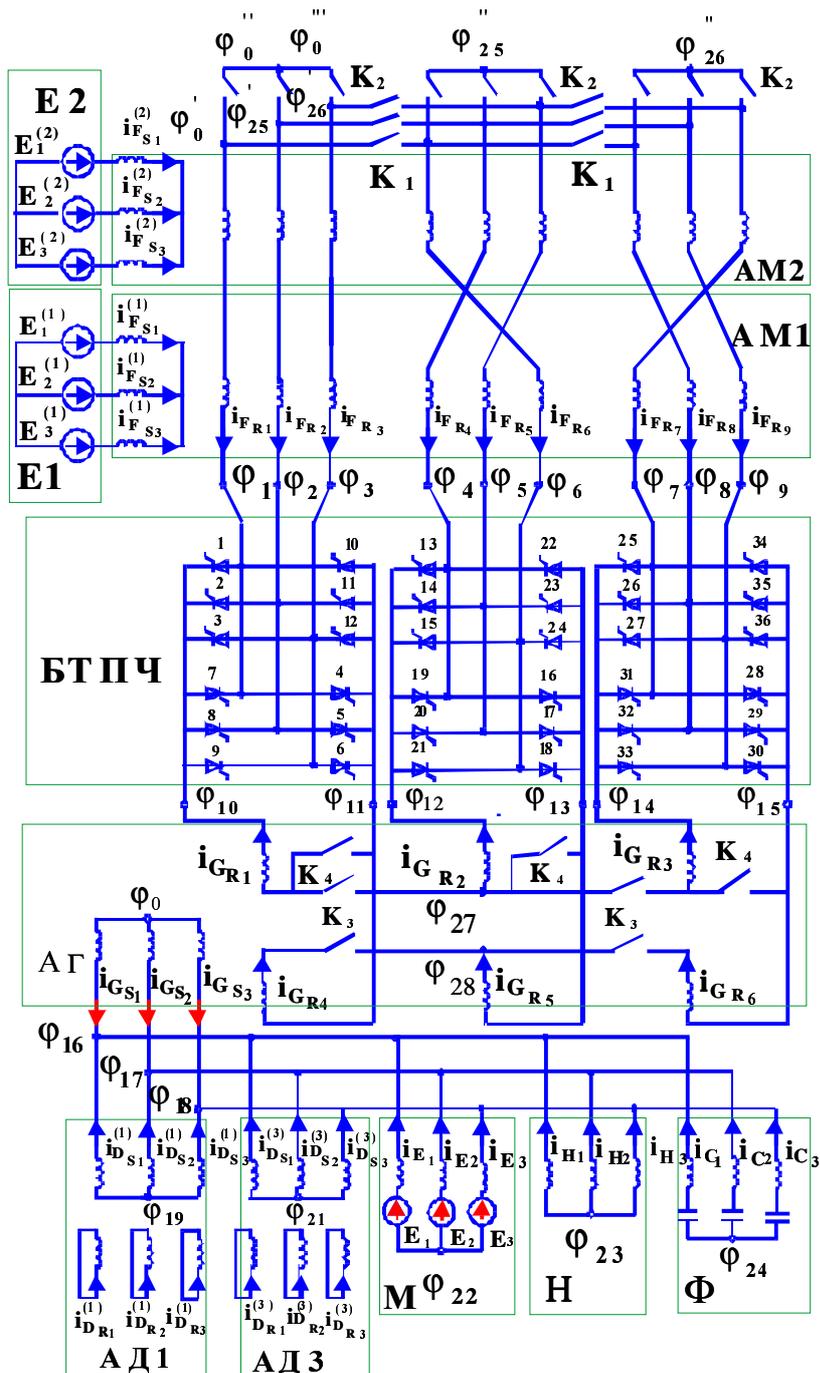


Рис. 1. Схема силового электричного кола АЕЕС

Аналогічно для обмоток ротора генератора передбачено два варіанти з'єднання. За першим з них розщеплені вітки ротора генератора з'єднані у дві зірки ($K_G=1$), коли ключі K_4 розімкнені, а ключі K_3 замкнені, тобто розщеплені вітки обмоток ротора генератора утворюють дві зірки. При такому стані ключів моделюється і з'єднання в одну зірку (першу чи другу). Вентилі неробочої зірки повинні бути запертими і не керованими. Ця процедура виконується вже на етапі функціонування програми. При такому з'єднанні утворюються два вузли з потенціалами ϕ_{27} , ϕ_{28} . Другий варіант ($K_G=2$) передбачає ключі K_4 замк-

ними, а ключі K_3 розімкненими, коли фазні обмотки ротора не розщеплені, а БТПЧ розпадається на три мостові схеми.

Для дослідження електромагнітних процесів АЕЕС використаємо математичну модель [4] та відповідне цій моделі програмне забезпечення. Дослідження проведемо для роботи ГСЧ у асинхронному режимі, коли машини АМ1 та АМ2 модулятора мають різну кількість пар полюсів, а на вході БТПЧ формується модульована напруга з частотою модуляції, що дорівнює частоті ковзання. У такому режимі частота напруги генератора дорівнює частоті джерел живлення машин модулятора.

Розрахунки проводимо для генератора потужністю 100 кВт. Кількість пар полюсів машин модулятора 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.

На рис. 2 зображені розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для схеми з двома зірками на роторі генератора ($K_G = 1$) та при комбінованому з'єднанні розщеплених віток ротора модулятора ($K_F=1$). На початку процесу генератор працює у режимі неробочого ходу без регулятора. У момент часу $t=0,05$ с вмикається пропорційно-інтегральний регулятор стабілізації напруги. У момент часу $t=0,2$ с вмикається перший споживач активно-індуктивного навантаження, а у момент часу $t=1,0$ с вмикається другий споживач активно-індуктивного навантаження. Другий споживач тут моделюється електричною мережею, у моделі якої теж фігурують індуктивність та активний опір.

Як видно з рис. 2, перехідний процес закінчується у околі часу $t=3,0$ с. У цей час амплітуда напруги генератора досягає заданого значення, що становить 333 Вольти. На рис. 2, а кривими 1 та 2 зображено модулі зображуваних векторів (МЗВ) фазних напруг u_G^v та струмів i_G^v статора генератора. МЗВ є зручним інтегральним показником відповідних величин, що дає можливість простежити за характером періодичних величин на тривалих проміжках часу, які охоплюють велику кількість періодів. МЗВ напруги відображає значення амплітуди напруги. Кривою 3 на рис. 2, а зображено P_G розрахункову осцилограму активної потужності генератора. Напруги і струми на цьому рисунку вимірюються у Вольтах та Амперах, а активна потужність зображена у кВт, помножених на 4.

Як бачимо з цього рисунку, система автоматичного стабілізації напруги функціонує ефективно, а використання інтегральної ланки у регуляторі забезпечує високу точність стабілізації напруги. Гармонічний аналіз кривої напруги показує, що точність регулювання напруги сягає десятих часток Вольта, при заданому значенні у 333 Вольти. Така точність стабілізації напруги цілком відповідає практичним потребам.

Дуже важливим показником у роботі ГСЧ є його струм збудження. На рис. 2, б зображені розрахункові осцилограми струмів i_{GR_1} , i_{GR_2} , i_{GR_3} розщеплених віток першої зірки ротора генератора. Частота заповнення цих струмів дорівнює 150 Гц, а частота модуляції становить 1 Гц, що відповідає ковзанню генератора $S = -0,02$. На рис. 2, в зображені розрахункові

осцилограми півсуми струмів розщеплених віток ротора генератора $i_{G\mu} = (i_{G\mu_1}, i_{G\mu_2}, i_{G\mu_3}) = \frac{1}{2}(i_{G_{R_1}} + i_{G_{R_4}}, i_{G_{R_2}} + i_{G_{R_5}}, i_{G_{R_3}} + i_{G_{R_6}})$. Вектор струмів $i_{G\mu}$ є еквівалентом намагнічуючої сили генератора. Характер цього струму має прямий вплив на якість напруги. Як видно з рис. 2, в, криві цих струмів є гладкими, а пояснюється це протифазою по частоті заповнення струмів однойменних фаз розщеплених віток ротора генератора двох зірок.

На рис. 2, г кривими 1, 2, 3 зображені $u_{GS_1}, u_{GS_2}, u_{GS_3}$ розрахункові осцилограми фазних напруг статора генератора. Кривими 4, 5, 6 зображені $i_{GS_1}, i_{GS_2}, i_{GS_3}$ розрахункові осцилограми фазних струмів статора генератора, а кривими 7 та 8 зображено u_G^V та i_G^V модулі зображуючих векторів фазних напруг та струмів статора генератора. З цього рисунку видно, що якість напруги генератора є високою. Частота напруги дорівнює 50 Герц, а її амплітуда становить задане значення 333 Вольти. Проведено гармонічний аналіз кривих з рис. 2, г за результатами якого встановлено кількісні значення амплітуд гармонічних складових.

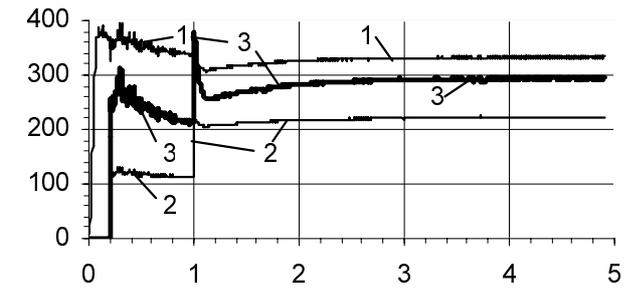
Істотний вплив на перебіг електромагнітних процесів у збуджувачі і генераторі загалом має взаємне розміщення розщеплених віток ротора генератора. На рис. 3 зображені ті ж величини, що і на рис. 2, але для випадку, коли розщеплені вітки ротора генератора розміщені у різних пазах і зміщені між собою на кут $\alpha_G = 30^\circ$. З рис. 3, б видно, що якість струмів розщеплених віток ротора генератора поліпшилася. Це пояснюється зменшенням взаємного впливу струмів розщеплених віток ротора через магнітні зв'язки, що вплинуло на роботу системи керування комутатором. Проте якість напруги не стала вищою, що видно з рис. 3, г та результатів гармонічного аналізу.

На рис. 4 зображені ті ж величини, що і на рис. 2 та 3, але для схеми з двома зірками, коли $K_G = 1$ і $K_F = 3$. Обмотки розщеплених віток однойменних фаз ротора генератора розміщені у одних і цих самих пазах, тобто $\alpha_G = 0^\circ$. З'єднання розщеплених віток ротора модулятора у спільний вузол погіршує якість напруги порівняно з комбінованим з'єднанням, що навіть візуально помітно з характеру розрахункових осцилограм на рис. 2 та 4.

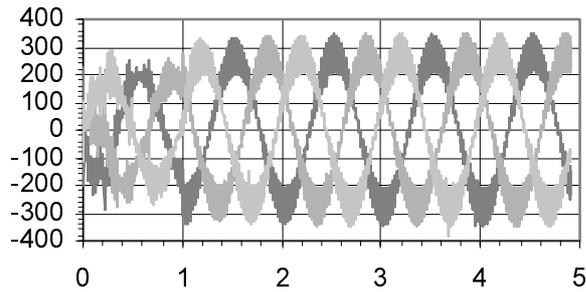
Одним із можливих варіантів схеми генератора є наявність лише однієї зірки. Позитивним моментом у такій схемі є менша кількість вентилів (18 штук). Результати розрахунку електромагнітних процесів для цієї схеми зображені на рис. 5. Якість струму ротора генератора є достатньо високою порівняно з струмами для схеми з двома зірками при $K_F = 1$ та $\alpha_G = 0^\circ$, але гармонічний склад напруги є дещо гіршим.

Останнім варіантом електричної схеми ГСЧ, для якої наведемо результати аналізу електромагнітних процесів, є схема, у якій фазні обмотки ротора живляться від мостових перетворювачів частоти $K_G = 2$. На рис. 6 зображено результати розрахунку електромагнітних процесів для мостової схеми БТПЧ при комбінованому з'єднанні розщеплених віток ротора модулятора ($K_F = 1$).

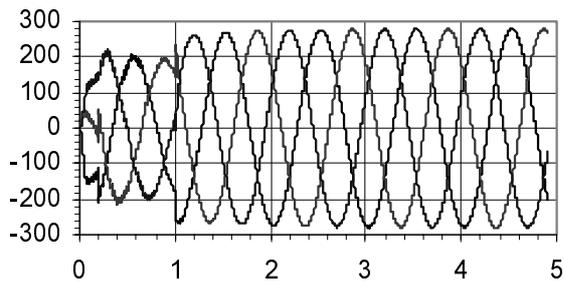
З рис. 6 видно, що мостова схема не забезпечує доброї якості ні для струму збудження, ні для напруги генератора. Інші схеми модулятора ($K_F = 2$ та $K_F = 3$) для мостової схеми дають ще гірші результати. У таких схемах існує істотне коливання амплітуди напруги, оскільки ці схеми не забезпечують стійкої роботи комутатора.



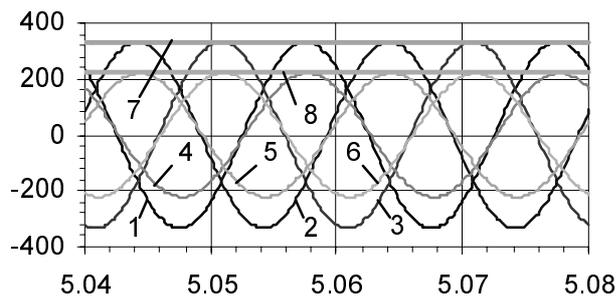
а) u_G^v, i_G^v – МЗВ напруг і струмів (криві 1, 2) статора ГСЧ; P_G – активна потужність генератора (крива 3);



б) $i_{GR_1}, i_{GR_2}, i_{GR_3}$ – струми 1-ї зірки ротора ГСЧ;

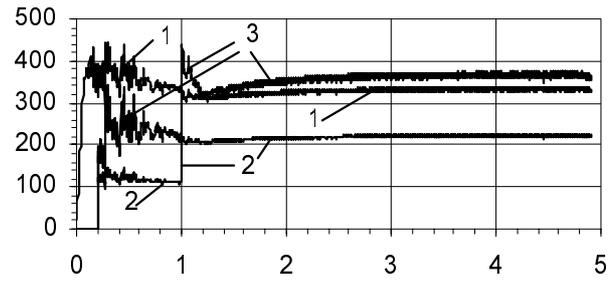


в) $i_{G_{\mu 1+3}}$ – півсуми струмів зірок ротора ГСЧ;

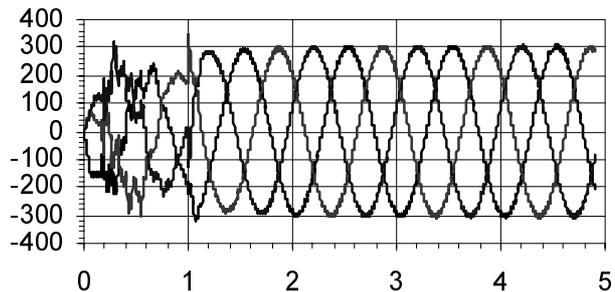


г) u_{GS}, i_{GS} – вектори напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1÷3 та 4÷6); u_G^v, i_G^v – МЗВ u_{GS}, i_{GS} (криві 7, 8)

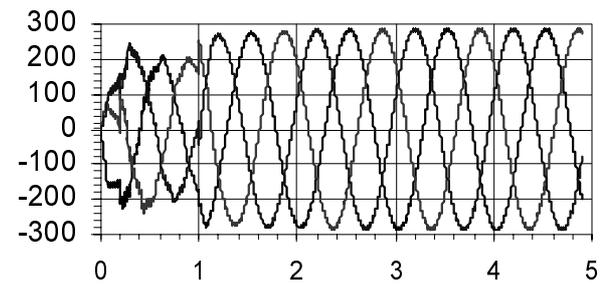
Рис. 2. Розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для схеми ГСЧ з двома зірками ($K_G=1$) та комбінованим з'єднанням розщеплених віток ротора модулятора ($K_F=1$)



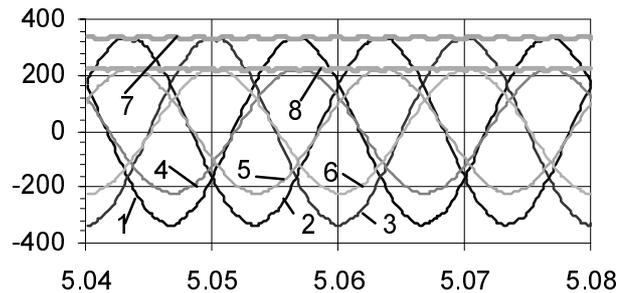
а) u_G^v, i_G^v – МЗВ напруг і струмів (криві 1, 2) статора ГСЧ; P_G – активна потужність генератора (крива 3);



б) $i_{GR_1}, i_{GR_2}, i_{GR_3}$ – струми 1-ї зірки ротора ГСЧ;

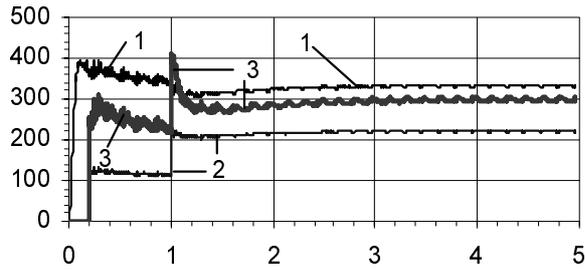


в) $i_{G_{\mu 1+3}}$ – півсуми струмів зірок ротора ГСЧ;

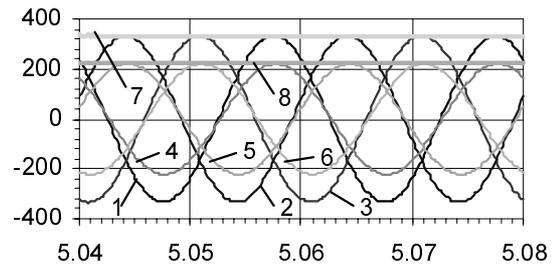


г) u_{GS}, i_{GS} – вектори напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1÷3 та 4÷6); u_G^v, i_G^v – МЗВ u_{GS}, i_{GS} (криві 7, 8)

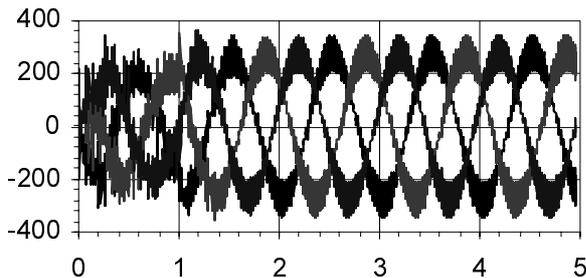
Рис. 3. Розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для схеми ГСЧ з двома зірками ($K_G=1$) та комбінованим з'єднанням віток ротора модулятора ($K_F=1$) при $\alpha_G = 30^\circ$



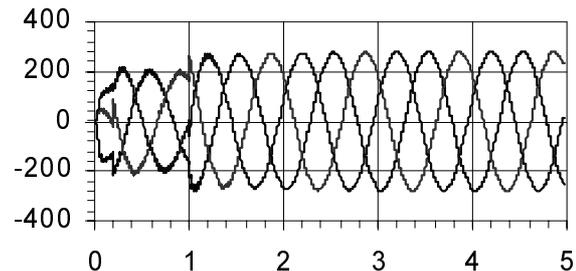
а) u_G^v, i_G^v – МЗВ напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1, 2); P_G – активна потужність (крива 3);



б) u_{GS}, i_{GS} – вектори напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1–3 та 4–6); u_G^v, i_G^v – МЗВ u_{GS}, i_{GS} (криві 7, 8);

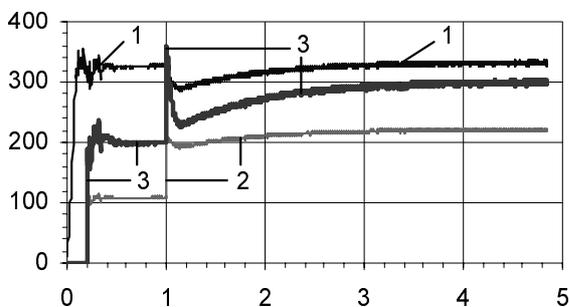


в) $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – струми 1-ї зірки ротора ГСЧ;

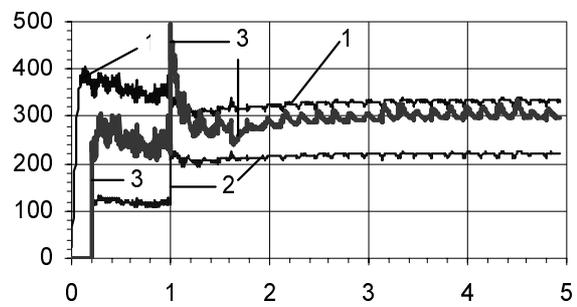


г) $i_{G_{\mu1+3}}$ – півсуми струмів зірок ротора ГСЧ;

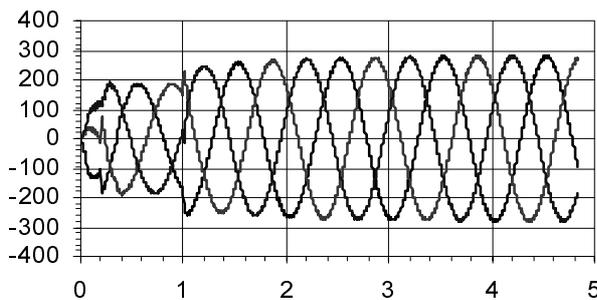
Рис. 4. Розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для схеми ГСЧ з двома зірками ($K_G=1$) та з'єднанням у один спільний вузол розщеплених віток ротора модулятора ($K_F=3$)



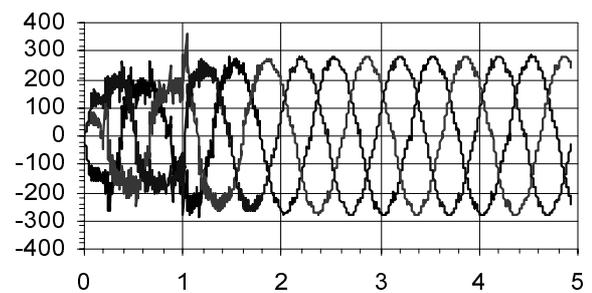
а) u_G^v, i_G^v – МЗВ напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1 та 2); P_G – активна потужність (крива 3);



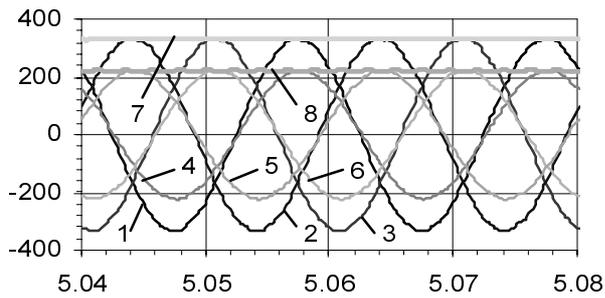
а) u_G^v, i_G^v – МЗВ напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1 та 2); P_G – активна потужність (крива 3);



б) $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – фазні струми ротора ГСЧ;

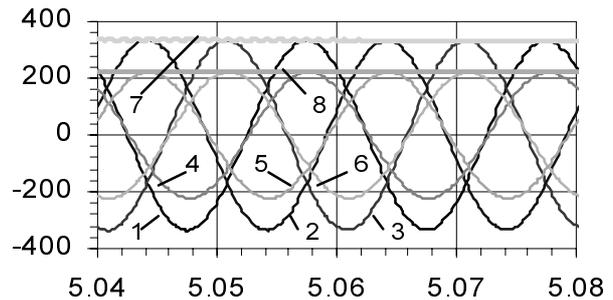


б) $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – фазні струми ротора ГСЧ;



г) u_{GS}, i_{GS} – вектори напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1–3 та 4–6); u_G^v, i_G^v – МЗВ u_{GS}, i_{GS} (криві 7, 8);

Рис. 5. Розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для схеми ГСЧ з однією зіркою ($K_G=1$) та комбінованим з'єднанням розщеплених віток ротора модулятора ($K_F=1$)



г) u_{GS}, i_{GS} – вектори напруг і струмів статора ГСЧ (криві 1–3 та 4–6); u_G^v, i_G^v – МЗВ u_{GS}, i_{GS} (криві 7, 8);

Рис. 6. Розрахункові осцилограми основних електромагнітних величин для мостової схеми ГСЧ ($K_G=2$) при комбінованому з'єднанні розщеплених віток ротора модулятора ($K_F=1$)

Висновки

1. При роботі ГСЧ на активно-індуктивне навантаження з шести можливих електричних схем генератора найнадійнішими у роботі є схеми з двома та однією зіркою. Найвищу якість напруги забезпечує комбіноване з'єднання розщеплених віток ротора модулятора, а окреме з'єднання розщеплених віток ротора модулятора не забезпечує працездатності генератора, що проявляється у коливаннях амплітуди напруги. З'єднання розщеплених віток ротора модулятора у один спільний вузол забезпечує працездатність схеми лише для двох зірок.

2. 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 та висока якість напруги статора генератора.

3. Мостова схема комутатора є працездатною лише при комбінованому з'єднанні розщеплених віток ротора модулятора. При окремому з'єднанні та з'єднанні розщеплених віток ротора модулятора у один спільний вузол робота перетворювача частоти є нестійкою, що призводить до недопустимого коливання амплітуди напруги генератора.

У статті охоплено лише достатньо вузьке коло питань, що стосуються функціонування АЕЕС на базі генератора стабільної частоти з трифазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем.

Електромагнітні процеси, що відбуваються у подібних системах вирізняються їх різноманітністю та складністю. Тому існує потреба їх подальшого ґрунтовного дослідження як у теоретичному, так і у практичному аспектах.

До переліку тем подальшого дослідження електромагнітних процесів АЕЕС слід зарахувати вивчення впливу нелінійності електромагнітних зв'язків машин модулятора та генератора, вивчення електромагнітних процесів системи при роботі генератора у синхронному режимі (при однакових кількостях полюсів машин модулятора). Особливо актуальною темою є вивчення закономірностей протікання електромагнітних процесів у динамічних режимах роботи системи (при змінному ковзанні генератора). Останнє питання

потребує розробки нової математичної моделі, оскільки наявні [3, 4] не дозволяють моделювати динамічні режими.

Окреслений перелік проблем розглядається як план на перспективу щодо дослідження електроенергетичних систем на базі генераторів з безконтактними модульованими збуджувачами.

1. Галиновский А.М. *Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты* // Тр. I Междунар. (III Всероссийской) конф. по электромеханотронике. – СПб., 1997. – С. 182–192. 2. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Васылив К.Н., Хайкал Шейбан Фуад. *Способ управления и качество формы кривой выходного напряжения модулированного преобразователя частоты* // Тр. I Междунар. (III Всероссийской) конф. по электромеханотронике. – СПб., 1997. – С. 116–222. 3. 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., 2000. – С. 153–163. 4. Василів К.М., Галіновський О.М. *Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем.* // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2002, ч. 2. – С. 95–102. 5. Василів К.М. *Аналіз електромагнітних процесів неробочого ходу генератора стабільної частоти з безконтактним модульованим збуджувачем на базі трифазно-трифазного безпосереднього перетворювача частоти* // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 449. – С. 37–47. 6. Василів К.М. *Аналіз електромагнітних процесів неробочого ходу генератора стабільної частоти з безконтактним модульованим збуджувачем на базі двопульсного перетворювача частоти* // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – № 418. – С. 22–29. 7. Василів К.М. *Аналіз електромагнітних процесів генератора стабільної частоти з безконтактним модульованим збуджувачем на базі двофазно-трифазного перетворювача частоти при роботі на статичне навантаження* // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2001. – № 435. – С. 28–36.