

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ ПІД ЧАС РОБОТИ НА КОМБІНОВАНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

© Василів К.М., 2014

Методом математичного експерименту виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним модульованим збуджувачем. Проаналізовано процеси на предмет роботоздатності системи живлення під час її роботи на вузол асинхронних двигунів та активно-індуктивне навантаження. Встановлено закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів залежно від графіка роботи споживачів та параметрів системи керування комутатором.

*Ключові слова: автономна система електроживлення, асинхронізований генератор, асинхронна машина, модулятор, тиристорний перетворювач частоти, напруга, струм, частота.*

Investigation of electromagnetic and electromechanical processes, which take place in the autonomous power supply system based on asynchronous generator with three phase modulated exciter, was conducted by means of mathematic experiment. The processes in terms of work suitability of power supply system during its work at the junction of asynchronous motors and active-inductive load were analysed. Regularities of electromagnetic and electromechanical processes, depending on the schedule of consumers' work and system of commutator management parameters were determined.

*Key words: autonomous power supply system, asynchronous generator, asynchronous machine, modulator, thyristor frequency converter, voltage, current, frequency.*

### Постановка проблеми

Очевидним є те, що сьогодні, як і на тривалу перспективу, автономні системи електроживлення (АСЕЖ) слугують і надалі слугуватимуть одним з основних засобів електропостачання в багатьох галузях господарства як України зокрема, так і в багатьох інших країнах загалом. Також загальновідомо, що характерною особливістю АСЕЖ є нестабільність частоти обертання ротора генератора, що тягне за собою проблему нестабільності частоти напруги. Ретельний аналіз науково-технічної літератури показує, що, не зважаючи на те, що сьогодні наука і практика в галузі електромеханіки та електроенергетики пропонує низку ефективних способів стабілізації частоти напруги, ця проблема продовжує залишатися актуальною. З цього погляду АСЕЖ на базі асинхронізованого генератора (АСГ) з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) належать до перспективних, бо вони характеризуються високим рівнем надійності в роботі і високим рівнем стабілізації частоти напруги генератора за умов змінної швидкості обертання ротора.

Сьогодні вже виконано дуже важливий обсяг робіт, пов'язаний з розробленням концепції систем електроживлення на базі АСГ з БКМЗ. Так, в [1] започатковано теоретичну концепцію генераторів стабільної частоти на базі АСГ з БКМЗ. Доведено, що стабілізація частоти напруги генератора на підставі явища модуляції напруги безконтактного збуджувача дає змогу отримати ідеаль-

ну якість напруги за критерієм гармонічного спектра напруги генератора завдяки живленню обмотки збудження струмом частоти ковзання, що в таких системах забезпечує стабільну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора, а це, своєю чергою, ідеально стабільну частоту напруги генератора.

Важливо зазначити, що самі АСГ з БКМЗ відзначаються складністю як з погляду їх будови (окрім самого генератора сюди входять дві асинхронні машини модулятора напруги та вентильний перетворювач частоти), так і з погляду складності електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в таких генераторах. Тому, з метою встановлення фундаментальних закономірностей роботи цих систем необхідно провести всебічне дослідження перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів як для різних схемних рішень (загалом тут можливо 16 схем), так і з погляду роботи АСЕЖ на різноманітні навантаження, наприклад, асинхронні двигуни (АД) та активно-індуктивне навантаження (R-L).

У статті вирішується науково-практична проблема аналізу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ під час її роботи водночас на вузол асинхронних двигунів та активно-індуктивне навантаження.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в таких системах, виконано великий обсяг робіт з розроблення електротехнічних методів, математичних моделей та на їх підставі алгоритмів і програмних комплексів, які за допомогою сучасних інформаційних технологій дають змогу проводити всебічні дослідження з метою оптимізування параметрів структурних компонентів таких СЕЖ. Ця масштабна робота відображена в низці наукових праць [2–6], серед яких [2], в якій найповніше систематизовано отримані результати.

Враховуючи те, що електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в таких системах електроживлення, належать до особливо складних з погляду характеру визначальних координат та їх функційних взаємозв'язків, важливим є аналіз роботи такої АСЕЖ для кожної з можливих схем силового електричного кола в поєднанні з роботою АСГ на навантаження всіх можливих видів. Так у [5] виконано аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою збуджувача в одну зірку під час роботи генератора на активно-індуктивне навантаження. У [6] розглянуто варіант схеми модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок роторів машин модулятора під час роботи генератора на вузол асинхронних двигунів. У контексті цих двох наукових праць невирішеним залишається питання поведінки АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою збуджувача в одну зірку під час одночасної роботи генератора на активно-індуктивне навантаження і вузол асинхронних двигунів. Така інформація є принципово важливою як в теоретичному, так і в практичному аспектах з огляду на специфіку впливу роботи споживачів стосовно функціонування системи живлення загалом.

### **Мета статті**

Практика досліджень показує, що стійкість роботи АСЕЖ загалом значною мірою визначається стабільністю роботи вентильного перетворювача частоти, яка, своєю чергою, істотно залежить від характеру перебігу процесів у споживачах. Тому, для повноти досліджень АСЕЖ ставиться за мету проаналізувати електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються під час роботи автономного асинхронізованого генератора на комбіноване навантаження, яке об'єднує як вузол асинхронних двигунів, так і активно-індуктивне навантаження, та на підставі цього аналізу визначити допустимі параметри режимів роботи АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою в одну зірку для двох схем силового електричного кола модулятора (коли фазні гілки роторів машин модулятора з'єднані у спільний вузол і коли вони мають потенціальне комбіноване з'єднання).

### **Виклад основного матеріалу**

Отже, як зазначено вище, метою статті є аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з

трифазно-трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем, схема силового електричного кола якої зображена на рис. 1. З цього рисунку видно, що структурними елементами АСЕЖ слугують: дві асинхронні машини модулятора АМ1 та АМ2; два джерела живлення цих машин відповідно Е1 та Е2; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої з'єднані в зірку. У схемі передбачено два можливі варіанти з'єднання фазних гілок машин модулятора: спільне, коли ключ  $K_0$  замкнений, і комбіноване, коли ключ  $K_0$  розімкнений. До системи живлення також входять споживачі: три асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3 та активно-індуктивне навантаження Н. Ключі  $K_1, K_2, K_3, K_4$  призначені для вмикання та відмикання споживачів.

Решта позначень на схемі рис.1 мають такий зміст. Літерами  $\phi, i, E$  позначено: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами  $F, G, H$  в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та активно-індуктивного навантаження. Літерами  $S, R$  в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначено номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 в нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. При цьому одним штрихом у верхньому індексі позначено потенціали  $\phi_0, \phi_{21}, \phi_{22}$ , які утворюються, коли ключ  $K_0$  розімкнений (комбіноване з'єднання), а двома штрихами – нульовий потенціал  $\phi_0''$ , який утвориться, коли ключ  $K_0$  замкнений (спільне з'єднання). Цифрами в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до машин модулятора АМ1, АМ2; джерел живлення модулятора Е1 і Е2 та асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3.

Зі схеми силового електричного кола системи живлення рис. 1 видно, що кожна з фаз обмоток роторів АМ1 та АМ2 розділені на три гілки, які з боку виходу з АМ2 і входу до АМ1 з'єднані між собою послідовно з перехрещенням фаз. Саме таке сполучення АМ1 та АМ2 утворює функційний структурний елемент, який забезпечує модуляцію напруги і тому називається модулятором [1].

Суть дослідження загалом полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого є розрахункові функційні залежності миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора, машин модулятора, а також асинхронних двигунів і їх електромагнітних моментів. Наявність таких залежностей дасть змогу зробити висновок про поведінку АСЕЖ для двох схемних рішень модулятора в різноманітних режимах роботи, які відрізняються значеннями параметрів навантажень (моментів навантаження асинхронних двигунів, опором і коефіцієнтом потужності активно-індуктивного навантаження тощо).

Дослідження автономної системи електроживлення проведемо для асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Моделювання процесів виконаємо для режиму, в якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та виконується розгін ротора генератора. При досягненні швидкості обертання ротора, близької до синхронної, вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи виконується вмикання трьох споживачів АД<sub>1</sub>, АД<sub>2</sub>, АД<sub>3</sub> та активно-індуктивного навантаження Н.

Враховуючи те, що комбінація в часі ввімкнення споживачів є одним з визначальних чинників, які впливають на роботу генератора, під час дослідження визначимо декілька режимів роботи генератора з погляду послідовності ввімкнення та вимикання асинхронних двигунів і статичного навантаження. Такий підхід дасть змогу проаналізувати роботу АСЕЖ як під час поодинокого ввімкнення та відмикання споживачів, так і під час одночасного їх вмикання та відмикання.

Для автономних систем електроживлення найважливішими показниками якості електроенергії, як і роботи системи загалом слугують стабільність частоти та амплітуди напруги генератора. У нашому випадку частота напруги є стабільною априорі. Тому як про якість електроенергії, так і про роботоздатність АСЕЖ загалом судитимемо за критерієм амплітуди напруги генератора. У цьому контексті найважливішими координатами вважаємо модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора генератора і модуль зображувального вектора фазних струмів ротора генератора (струму збудження АСГ)  $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$ .

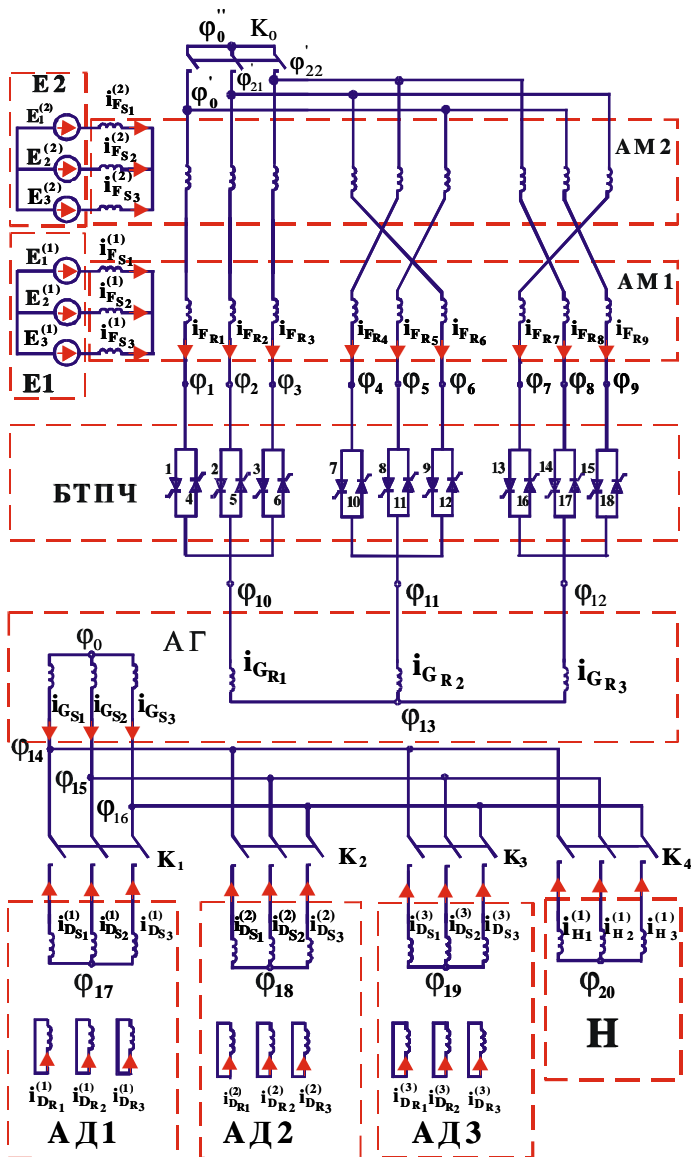
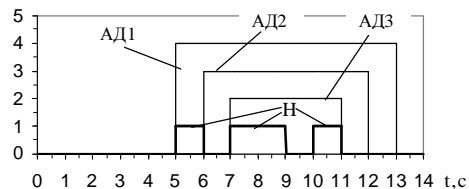
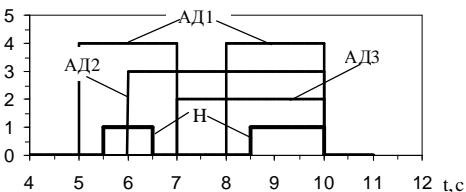


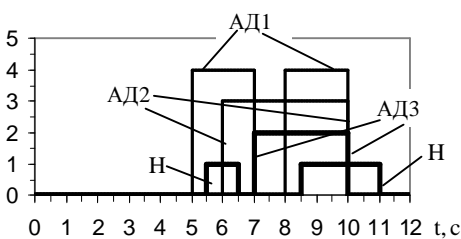
Рис. 1. Схема силового электрического кола АСЕЖ



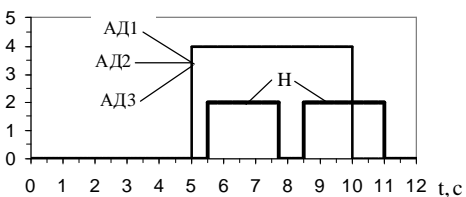
а) режим 1



б) режим 2



в) режим 3



г) режим 4

Рис. 2. Графіки вмикання споживачів

Отже, розрахунок електромагнітних і електромеханічних процесів виконаємо для чотирьох режимів. Графіки вмикання та вимикання споживачів зображені на рис. 2. Згідно з цим графіком в першому режимі (рис. 2, а) перший асинхронний двигун працює в межах від п'ятої по 13-ту секунду включно. У всіх чотирьох режимах розрахунок електромагнітних і електромеханічних процесів виконаємо для двох схем модулятора:  $KF=1$  (коли вимикач  $K_0$  розімкнений – схема з потенціальним комбінованим з'єднанням фазних гілок машин ротора модулятора) та  $KF=2$  (коли вимикач  $K_0$  замкнений – схема зі спільним з'єднанням фазних гілок машин ротора модулятора).

На рис. 3 та 4 зображені розрахункові залежності зображувальних векторів  $u_{G_s}^v, i_{G_s}^v, i_{\mu}^v$  для двох схем модулятора: відповідно  $KF=1$  та  $KF=2$ . Варто зазначити, що для всіх режимів розрахунків процесів протягом цілого робочого циклу функціонують системи автоматичного керування для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ.

З двох останніх рисунків видно, стабільніший характер має амплітуда напруги для першої схеми модулятора, тобто коли робота  $KF=1$ . Напруга для другої схеми модулятора характерна істотними відхиленнями в діапазоні пуску системи збудження та під час перехідних процесів, спричинених вмиканням асинхронних двигунів. Характер кривих зображувальних векторів напруг

та струмів  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  рис. 3 вказує на те, що поодинокі вмикання споживачів для АСЕЖ зі схемою модулятора  $KF=1$  гарантує роботопридатність роботи системи електроживлення, забезпечуючи стабільне в допустимих державними стандартами значення відхилення амплітуди напруги, спричинених вмиканням системи збудження асинхронізованого генератора та споживачів електроенергії, якими слугують асинхронні двигуни та активно-індуктивне навантаження.

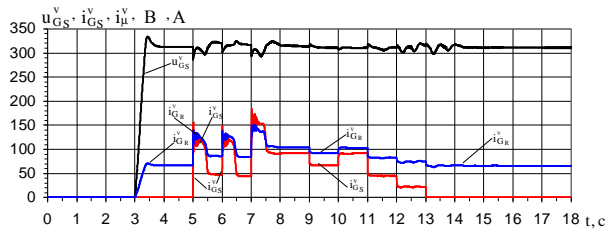


Рис. 3. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=1$

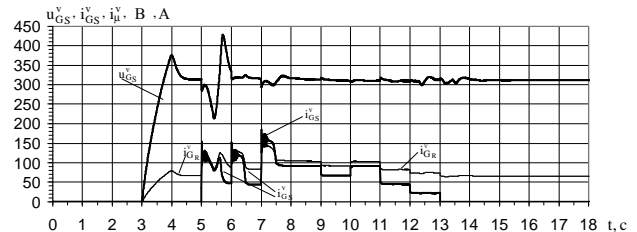


Рис. 4. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=2$

Для того, щоби з'ясувати вплив на роботопридатність АСЕЖ графіка роботи споживачів (наприклад, для співвимірної потужності генератора і споживачів одночасне вмикання асинхронних двигунів може мати критичний негативний вплив на стійкість роботи генератора) виконаємо розрахунок електромагнітних і електромеханічних процесів для другого режиму рис. 2, б). Розрахункові залежності інтегральних координат  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для цього режиму зображені на рис. 5 та 6. З рис. 2, б) видно, що цей режим характерний одночасним відмиканням всіх споживачів у момент часу  $t=10$ с., одночасним ввімкненням АД1 та Н в момент часу  $t=5$ с., а також одночасним відмиканням АД1 та вмиканням статичного навантаження Н в момент часу  $t=7$  секунд. З рис. 5 та 6 видно, що одночасне відмикання всіх споживачів призводить до істотного коливання напруги для обидвох схем модулятора. Тут як і в попередньому режимі схема модулятор  $KF=1$  забезпечує вищий рівень стабільності амплітуди напруги в часовому діапазоні роботи генератора на споживачі, а коливання напруги після вимикання споживачів не має жодного впливу на вимкнені споживачі, але може мати певний вплив на роботу самого генератора в режимі неробочого ходу.

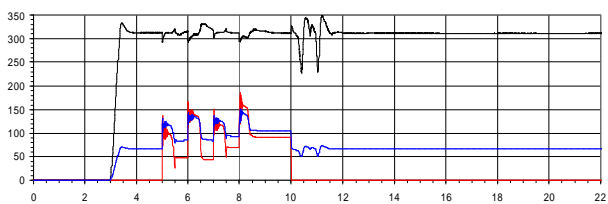


Рис. 5. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=1$

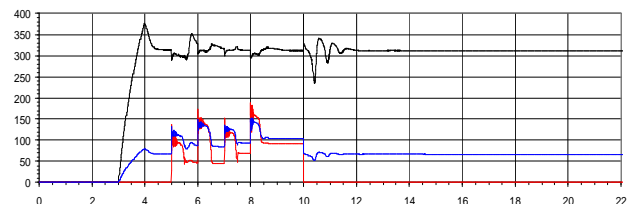


Рис. 6. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=2$

Результати розрахунку режиму 3 рис. 2в) зображені на рис. 7 та 8. Цей режим характерний одночасним відмиканням всіх трьох асинхронних двигунів під час роботи статичного навантаження Н в момент часу  $t=10$  с. та одночасним відмиканням АД1 і вмиканням АД3 в момент часу  $t=7$  с. З рис. 7 та 8 видно, одночасне відмикання асинхронних двигунів призводить до коливання амплітуди напруги, яке все ж не виходить за межі допустимого. Стосовно схеми модулятора, то тут також перша схема  $KF=1$  забезпечує вищий рівень стабільності амплітуди напруги.

Аналогічно розглянемо четвертий режим роботи АСЕЖ рис. 2г). Характерним для четвертого режиму роботи є одночасне вмикання в момент часу  $t=5$  с. та одночасне відмикання в момент  $t=10$  с всіх трьох асинхронних двигунів. Робота асинхронних двигунів супроводжується вмиканням та відмиканням статичного навантаження Н. Розрахункові залежності основних інтегральних

координат  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  зображені на рис. 9 та 10. З цих рисунків виразно видно, що одночасний пуск трьох асинхронних двигунів, сумарна потужність яких разом з потужністю статичного навантаження сумірна з потужністю генератора, спричиняє істотні проблеми стосовно стабільності амплітуди напруги та пуску самих асинхронних двигунів. Отримані розрахункові залежності цих координат становлять цінну інформацію не лише в науковому аспекті, але й мають практичне значення, бо дають змогу визначити допустимі режими роботи споживачів, що першочергово актуально для пуску асинхронних двигунів.

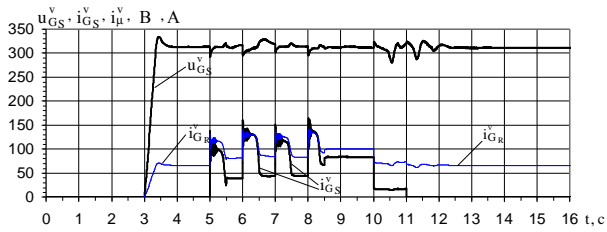


Рис. 7. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=1$

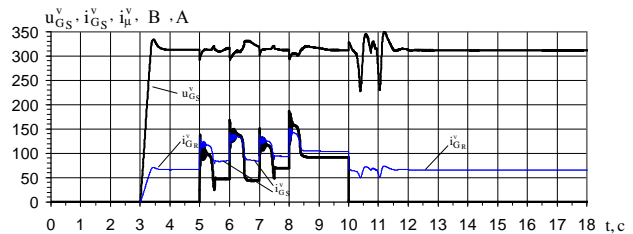


Рис. 8. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=2$

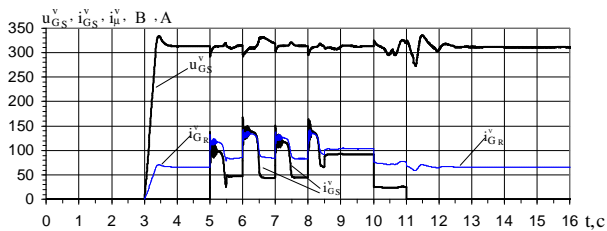


Рис. 9. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=1$

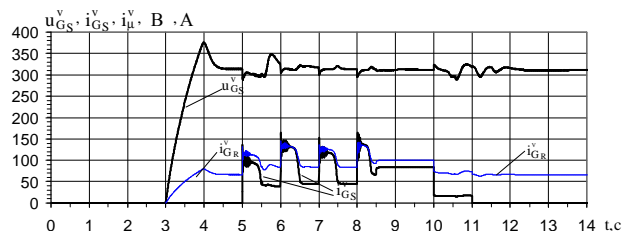


Рис. 10. Розрахункові залежності  $u_{G_S}^v, i_{G_S}^v, i_{\mu}^v$  для  $KF=2$

Для повноти інформації стосовно четвертого режиму роботи споживачів розглянемо розрахункові залежності електромагнітних моментів  $M_D^{(1)}, M_D^{(2)}, M_D^{(3)}$  та кутових частот обертання  $\omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}, \omega_D^{(3)}$  роторів асинхронних двигунів. Розрахункові залежності електромагнітних моментів та частот обертання роторів асинхронних двигунів для схеми модулятора  $KF=1$  зображені на рис. 11 та 12, з яких видно, що криві цих координат для всіх трьох двигунів накладаються, бо їх потужності, а також характеристики механічних навантажень ідентичні. Характер кривих  $\omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}, \omega_D^{(3)}$  на рис. 12 вказує на те, що розгін асинхронних двигунів відбувається без істотних відхилень. Тому з погляду роботи виконавчих механізмів, які приводяться в рух асинхронними двигунами, такий режим роботи є цілком прийнятний, а обмеження його практикування можуть накладатися лише з погляду коливання амплітуди напруги.

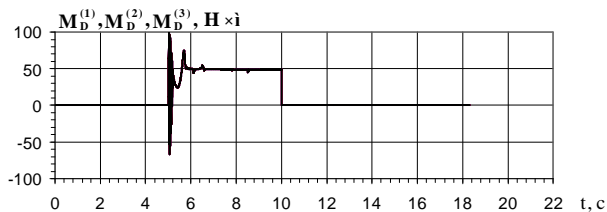


Рис. 11. Розрахункові залежності  $M_D^{(1)}, M_D^{(2)}, M_D^{(3)}$  для  $KF=1$

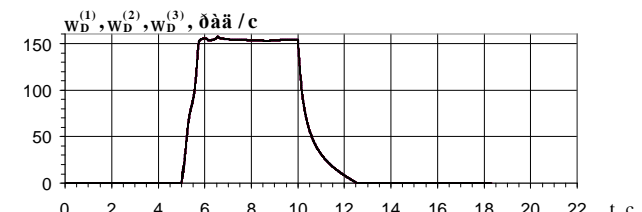


Рис. 12. Розрахункові залежності  $\omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}, \omega_D^{(3)}$  для  $KF=1$

## Висновки

1. Порівняльний аналіз характеру перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ за схемами модулятора зі спільним та комбінованим з'єднанням фазних гілок машин модулятора під час одночасної роботи генератора на вузол асинхронних двигунів і активно-індуктивне навантаження показує, що схема модулятора з комбінованим з'єднанням забезпечує вищий рівень стійкості роботи комутатора і системи електроживлення загалом. Це пояснюється тим, що алгоритм функціонування системи керування комутатором на одному з етапів передбачає роботу вентилів у інверторному режимі, що істотно збільшує ймовірність перекидування вентилів. Перекидування вентилів призводить до того, що у схемі силового електричного кола окремих трифазних груп роторів машин модулятора утворюються короткозамкнені контури, які замикаються через фазні гілки роторів машин модулятора та робочі (нормально відкриті) і неконтрольовано відкриті (перекинуті) вентиля циклоконвертора, оминаючи фазні гілки ротора генератора (див. рис. 1). А це призводить до недопустимого зростання струму у фазних контурах роторів машин модулятора, дисбалансу фазних струмів ротора генератора і, як наслідок, зменшення магнітного потоку, що негативно впливає на стабільність амплітуди напруги генератора.

2. На стійкість роботи АСЕЖ критично впливає величина та характер механічного навантаження асинхронних двигунів і параметрів статичного навантаження включно з коефіцієнтом потужності, а також величина вставки за струмом комутатора та графік роботи споживачів.

3. Оптимізація графіка роботи споживачів сприяє підвищенню співвідношення їх потужності до потужності генератора, а оптимальність графіка роботи споживачів визначається за критерієм зменшення сумарної потужності споживачів, які підлягають ввімкненню та вимиканню водночас.

4. Для практичного впровадження системи генерування цього класу за схемою генератора в одну зірку рекомендується АСГ з безконтактною системою збудження на базі трифазно-трифазного каскадного модулятора за схемою комбінованого з'єднання фазних гілок машин модулятора.

*1. Галиновский А. М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А. М. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С. 182–192. 2. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Василів Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с. 3. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С. 54–60. 4. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 50–55. 5. Василів К. М. Порівняльний аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження / К. М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: . – 2013. – № 1. – С. 12–16. 6. Василів К. М. Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на вузол асинхронних двигунів / К. М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: . – 2013. – № 2. – С. 23–28.*