

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

ХАЙ Михайло Васильович

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
БЕЗКОНТАКТНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ  
СУМЩЕНОГО ВИКОНАННЯ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів 1996

621. 513

АВ 34.076

Дисертацією є рукопис

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00753879 (\$)

Робота виконана в Державному

- Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Глухівський Лев Йосипович
- Науковий консультант - кандидат технічних наук, доцент Маляр Василь Сафронівч

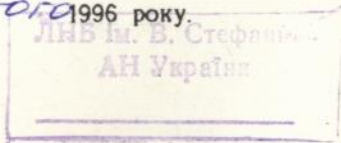
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Шумілов Юрій Андрійович  
кандидат технічних наук, доцент Лябук Микола Никифорович

Провідна організація: Інститут електродинаміки НАН України, м.Київ

Захист відбудеться *"25" Березня* 1996 року на засіданні спеціалізованої вченої ради К04.06.17 в Державному університеті "Львівська політехніка" (головний навчальний корпус, аудиторія *114*), о *16* год *00*хв за адресою: 290646, м.Львів-13, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий *"22" лютого* 1996 року.



Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

*Марушак Я.Ю.*

Марушак Я.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** В промисловості, малій енергетиці, особливо на транспорті й в оборонній сфері, широко використовуються для виробництва електроенергії синхронні генератори, що приводяться в рух дизельними чи карбюраторними двигунами. Такі автономні генератори виготовляють, як правило, зі збудником, розташованим на одному валі з генератором, і мають два комплекти послідовно з'єднаних ковзних контактів: один на колекторі генератора постійного струму, а другий - на контактних кільцях обмотки збудження основного генератора. Однак ковзні контакти мають ряд недоліків, тому одним із радикальних шляхів підвищення надійності, спрощення технології виготовлення та обслуговування синхронних машин є відмова від використання шіткових електричних контактів і перехід до безконтактного їх виконання.

Для пересувних електроенергетичних установок важливими показниками є їх маса та габарити. У ряді випадків ці показники є визначальними. Оскільки сучасні синхронні генератори в цілому, і автономні зокрема, характеризуються високим рівнем використання активних матеріалів, то дальше покращення їх масо-габаритних показників може бути досягнуто лише за рахунок виконання збудника та генератора в єдиному магнітопроводі, тобто магнітно сумішеними. При цьому важливо, щоб електроенергетичні характеристики сумішених синхронних генераторів були не гірші від синхронних генераторів з окремим збудником. Виконання генератора та його збудника у спільному магнітопроводі дозволяє зменшити габарити та витрати матеріалів. Однак, не зважаючи на численні авторські свідчення, сумішені синхронні генератори поки що не знайшли поширення в автономній енергетиці, оскільки вони практично не розроблені й відповідно не освоєні промисловими підприємствами. Це пояснюється в першу чергу відсутністю математичних моделей сумішених машин, які б дозволяли виконувати математичні експерименти з дослідження їх поведінки в різних експлуатаційних режимах роботи з достатньою для цілей проектування точністю. Необхідність врахування насичення магнітопровода та взаємного впливу магнітних полів обмоток генератора і збудника, як таких, що мають різну кількість пар полюсів, не дозволяють використати математичний апарат загальної теорії електричних машин, а розроблена теорія сумішених машин базується на допущенні про лінійність електромагнітних зв'язків. Розв'язання задач з дослідження та проектування безконтактних синхронних гене-

раторів з сумішеним збудником при відсутності адекватної математичної моделі вимагає застосування такого трудомісткого та неекономічного методу досліджень, як натурне моделювання на експериментальних установках. Тому створення математичної моделі з урахуванням насичення магнітопровода, яка б забезпечувала розв'язання основних задач теорії сумішених безконтактних синхронних машин і задовільняла сучасним вимогам інженерної практики, є актуальне.

**Об'єктом дослідження** у роботі є безконтактні синхронні генератори сумішеного виконання (БСГС) промислової частоти, призначені, як правило, для роботи у складі електроагрегатів з приводом від двигунів внутрішнього згоряння.

**Мета дисертації:** розвиток теорії безконтактних синхронних генераторів сумішеного виконання; створення математичної моделі БСГС з урахуванням нелінійності електромагнітних зв'язків та вищих гармонічних складових намагнічувальних сил, орієнтованої на застосування сучасної обчислювальної техніки; розроблення алгоритмів і програм розрахунку електромагнітних параметрів, перехідних процесів й усталених режимів роботи БСГС.

**Методи дослідження.** При розробленні математичної моделі безконтактного сумішеного синхронного генератора використані методи нелінійної електротехніки, теорії електричних машин і вентильних перетворювачів, а також методи прикладної математики, алгоритмізації і програмування. При дослідженні перехідних процесів застосовані чисельні методи інтегрування диференційних рівнянь (явний метод Рунге-Кутта і неявний метод формул диференціювання назад), а при дослідженні усталених режимів роботи БСГС – диференційний гармонічний метод. Для точного знаходження моментів зміни стану вентилів застосований метод інвертування диференційних рівнянь. Реалізація математичної моделі і дослідження електромеханічних процесів виконані на комп'ютері типу IBM в операційній системі DOS.

**Науковою новизною роботи** є:

- математична модель БСГС на основі розгалуженої заступної схеми магнітопровода з урахуванням вищих гармонічних складових намагнічувальних сил обмоток і зумовленого насиченням магнітопровода електромагнітного зв'язку обмоток з різною кількістю пар полюсів;
- алгоритми розрахунку перехідних процесів, усталених режимів роботи БСГС з урахуванням наявності вентилів в контурах машини;
- результати математичних та експериментальних досліджень перехідних процесів та усталених режимів роботи БСГС;

- схеми обмоток для даного класу машин;
- умови самозбудження БСГС.

**Практична цінність роботи** визначається створенням пакетом програм для аналізу процесів в безконтактному синхронному генераторі сумішеного виконання. Ці програми можуть бути використані при інженерному проектуванні в умовах конструкторських бюро та конструкторських відділів електромашинобудівних фірм. Застосування цих програм дозволяє значно скоротити час на дослідження перехідних процесів і усталених режимів роботи генератора з різними схемами обмоток та геометричними розмірами магнітопровода.

**На захист вноситься:**

- розроблена на основі нелінійної теорії електричних машин математична модель насиченого неявнополюсного БСГС, яка враховує взаємоіндуктивні зв'язки обмоток з різною кількістю пар полюсів, реальний розподіл намагнічувальних сил цих обмоток та наявність вентилів в контурах машини;
- алгоритм та програма розрахунку координат магнітного стану;
- алгоритм та програма розрахунку електромагнітних параметрів;
- алгоритм та програма розрахунку перехідних процесів явним методом чисельного інтегрування нелінійної системи рівнянь електричного стану;
- алгоритм розрахунку перехідних процесів неявним методом інтегрування нелінійної системи рівнянь електричного та магнітного станів;
- алгоритм розрахунку усталених режимів роботи БСГС диференціальним гармонічним методом;
- результати виконання на основі розроблених алгоритмів математичних експериментів з аналізу процесів, режимів та характеристик БСГС;
- результати експериментального дослідження макетного взірця БСГС.

**Реалізація результатів роботи.** Робота виконана згідно з програмою Держкомітету України з питань науки і технології за напрямком 5.51.2. "Розвиток перетворювальної техніки, як засобу енергетичного ресурсозбереження, підвищення технічного рівня продукції машинобудування", наказ N 15 від 1.03.1993 р.

Результати роботи використовуються в науково-дослідній роботі ДУ "Львівська політехніка".

**Апробація роботи.** Результати роботи доповідались і обговорювались на 1-й Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" (Львів, 1995), на семінарі Наукової Ради НАН України "Математичне моделювання та оптимізація динамічних кіл і електричних систем з вентиляними елементами" (Львів, 1994), а також на щорічних науково-технічних конференціях "Львівської політехніки" (1990-1994) і на наукових семінарах кафедри "Електричні машини".

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладений у п'яти друкованих роботах, отримане позитивне рішення від Держпатенту України на проведення попередньої експертизи і про можливість видання патенту України.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів і викладена на 162 сторінках з 20 рисунками, висновків і додатку. Основний текст займає 121 сторінку. Список літератури включає 135 найменувань.

## ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі обґрунтована актуальність роботи, проведено огляд схем існуючих безконтактних машин, проведено аналіз методів дослідження, показані мета, задачі, наукова новизна, практична цінність роботи і сформульовані основні положення, які виносяться на захист.

Як показав аналіз літератури стосовно розвитку синхронних генераторів промислової частоти, які призначені для роботи автономними джерелами електроенергії, однією з основних тенденцій є вдосконалення синхронних генераторів шляхом переходу до безконтактних систем збудження з застосуванням електронних пристроїв та сумішення магнітопроводів й обмоток електричних машин. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що сумішення двох електричних машин забезпечує економію конструктивних матеріалів на (13-18)%, ізоляції - до 10%, дещо знижується маса сталі зубців і ярма якоря, трудомісткість виготовлення й укладання обмотки, приблизно вдвічі зростає надійність машини.

В результаті літературного огляду проаналізовано найбільш характерні приклади статорних та роторних обмоток безконтактних машин з сумішеним збудником, що дозволило узагальнити ідеї, принципи побудови та особливості застосування цих обмоток і на їх основі скомпонувати та розрахувати конкретну схему БСГС.

Проведений аналіз методів розрахунку сумішених електричних машин показав, що усі створені математичні моделі сумішених машин базуються на лінійній теорії електричних машин і створеній на її основі теорії сумішених машин. Використання в сумішених синхронних машинах на статорі та роторі обмоток з неоднаковою кількістю пар полюсів вимагає глибокого вивчення взаємного впливу магнітних полів, створюваних цими обмотками в різних експлуатаційних режимах. Тому основним завданням дальшого розвитку сумішених синхронних машин є розроблення основ теорії й створення на їх основі математичних моделей високого рівня адекватності. Проведені за допомогою таких моделей математичні експерименти дають можливість всесторонньо аналізувати різні варіанти конструкції БСГС й вибирати найбільш раціональне виконання обмоток та магнітопровода.

Найточніше математичні експерименти дослідження режимів роботи БСГС можна здійснити на основі розрахунку магнітного поля в повітряному проміжку машини. Цей розрахунок можна виконувати двома способами:

- а) на основі чисельного розрахунку електромагнітного поля машини за рівняннями поля;
- б) на основі наближеного розрахунку магнітного поля з використанням заступної схеми магнітопровода.

Через громіздкість та велику затрату машинного часу перший спосіб доцільно використовувати при розв'язуванні окремих важливих задач з цього напрямку, зокрема – при обґрунтуванні заступної схеми магнітопровода. Другий спосіб, реалізація якого значно простіша, є перспективним для використання при інженерному проектуванні в умовах конструкторських бюро та конструкторських відділів електромашинобудівних фірм. В даній роботі застосовано саме такий спосіб.

У другому розділі розроблена математична модель БСГС високого рівня адекватності з урахуванням насичення ділянок магнітопровода, вищих гармонічних складових намагнічувальних сил обмоток та взаємоіндуктивних зв'язків обмоток з різною кількістю пар полюсів.

Об'єктом дослідження прийнято БСГС неявнополюсної конструкції, який має на статорі (рис.1) дві трифазні обмотки з кількістю пар полюсів  $p_1$ : обмотку (А, В, С) якоря і додаткову (х, у, з), яка живить через трифазний випрямляч розподілену однофазну обмотку (S) збудження збудника. Остання має кількість пар полюсів  $p_2$  ( $p_2 = \kappa p_1$ ;  $\kappa = 2, 3, \dots$ ). На роторі розташована обмотка (а, б, с) якоря збудника з кількістю пар полюсів  $p_2$ , яка живить через трифазний випрямляч обмотку збудження (F) з кількістю пар полюсів  $p_1$  та роз-

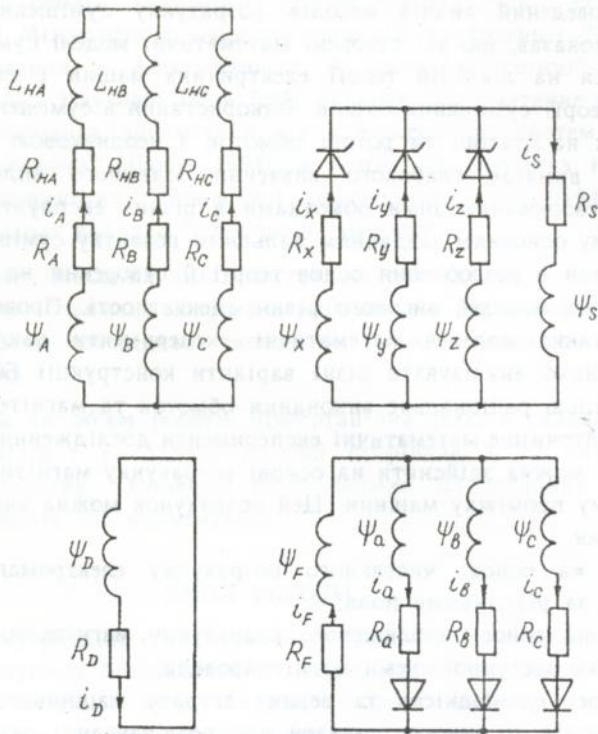


Рис. 1. Принципова електрична схема.

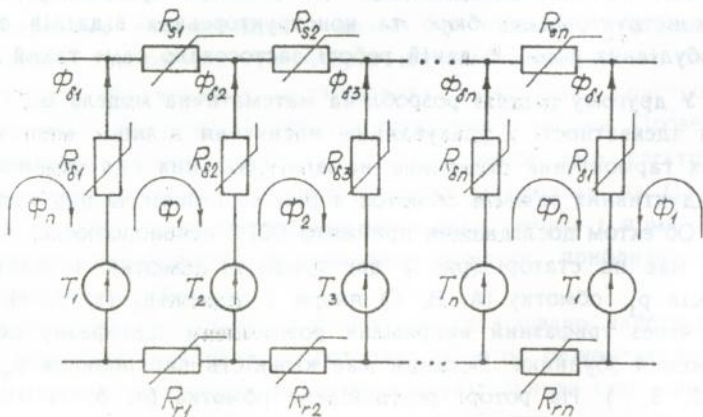


Рис. 2. Заступна схема магнітопровода.

поділена демпферна обмотка (D) з такою ж кількістю пар полюсів. Таким чином, БСГС має дві групи обмоток з різною кількістю пар полюсів:

- а) A, B, C, x, y, z, F, D - з кількістю пар полюсів  $p_1$ ;
- б) S, a, b, c - з кількістю пар полюсів  $p_2$ .

При ненасиченому магнітопроводі електромагнітний зв'язок між цими групами обмоток відсутній, тому що у них  $p_1 \neq p_2$ . При насиченні магнітопровода, внаслідок неоднакового насичення зубцевої зони вздовж полюсної поділки, між цими групами обмоток існує електромагнітний зв'язок. Тому в моделі розглядаються сумісно обидві групи обмоток машини.

В основу математичної моделі БСГС покладені допущення, які дозволяють врахувати насичення ділянок магнітопровода і несинусоїдність розподілу вздовж полюсної поділки намагнічувальних сил обмоток: матеріали магнітопровода вважаються безгістерезисними; втрати в сталі не враховуються; магнітне поле в машині представлено у вигляді двох складових - робочого поля і поля розсіяння; поле у повітряному проміжку плоскпаралельне; обмотки статора і ротора розташовані в нескінченно тонких шарах на внутрішній поверхні статора й зовнішній поверхні ротора відповідно; магнітопровід БСГС розбитий на ряд ділянок, які представляються зосередженими магнітними опорами, магнітні властивості яких описуються їх характеристиками намагнічування, розрахованими за заданими геометрією та характеристиками намагнічування матеріалів ділянок магнітопровода.

З урахуванням викладених допущень магнітопровід представлено заступною схемою, яка показана на рис.2. На цьому рисунку буквами T позначені намагнічувальні сили,  $\Phi$  - магнітні потоки, R - диференційні магнітні опори. Індокси при цих буквах означають належність до відповідної ділянки магнітного кола.

Заступна схема магнітопровода (рис.2) описується векторним рівнянням:

$$Q \vec{F}_\delta + \vec{F}_r + \vec{F}_s - Q \vec{T} = 0, \quad (1)$$

де

$$Q = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & -1 & & & & \\ \hline & 1 & -1 & & & \\ \hline & & 1 & & & \\ \hline \vdots & & & & & \\ \hline & & & & 1 & -1 \\ \hline 1 & & & & & 1 \\ \hline \end{array} \quad (2)$$

- квадратна матриця розміру  $n$ , де  $n$  - кількість рівновеликих секторів, на які розділений поперечний перетин магнітопровода радіальними площинами у межах  $\tau_1$ ;

$\vec{F}_\delta, \vec{F}_r, \vec{F}_s$  - вектори спадів напруг на ділянках магнітного кола, відповідно, в активній зоні, ярмі ротора та ярмі статора, які є нелінійними функціями відповідних магнітних потоків;

$$\vec{T} = \frac{1}{2} \frac{1}{p_1} \mathbf{V} \mathbf{W} \vec{i} \quad (3)$$

- вектор значень намагнічувальної сили, створюваної струмами всіх обмоток в  $n$  точках розрахункової зубцевої зони;

$$\mathbf{W} = \text{diag}(w_A, w_B, w_C, w_x, w_y, w_z, w_S, w_a, w_b, w_c, w_F, w_D) \quad (4)$$

- діагональна матриця кількостей витків обмоток машини;

$$\vec{i} = (i_A, i_B, i_C, i_x, i_y, i_z, i_S, i_a, i_b, i_c, i_F, i_D)_T \quad (5)$$

- вектор миттєвих значень струмів контурів БСГС (нижній індекс "T" означає операцію транспонування);

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} {}^{45}1A, & {}^{45}1B, & {}^{45}1C, & {}^{45}1x, & {}^{45}1y, & {}^{45}1z, & {}^{45}1S, & {}^{45}1a, & {}^{45}1b, & {}^{45}1c, & {}^{45}1F, & {}^{45}1D \\ {}^{45}jA, & {}^{45}jB, & {}^{45}jC, & {}^{45}jx, & {}^{45}jy, & {}^{45}jz, & {}^{45}jS, & {}^{45}jA, & {}^{45}jB, & {}^{45}jC, & {}^{45}jF, & {}^{45}jD \\ {}^{45}nA, & {}^{45}nB, & {}^{45}nC, & {}^{45}nx, & {}^{45}ny, & {}^{45}nz, & {}^{45}nS, & {}^{45}na, & {}^{45}nb, & {}^{45}nc, & {}^{45}nF, & {}^{45}nD \end{pmatrix} \quad (6)$$

- матриця значень у  $n$  вузлах функцій розподілу провідників усіх контурів. Ця функція для  $k$ -го контура визначається за формулою

$$\alpha_k = \frac{4}{\pi} \sum \left[ \frac{k_{wv}}{v} \cos(v\alpha_k - \beta_{vk}) \right], \quad (7)$$

де  $k_{wv}$  - обмотковий коефіцієнт  $v$ -ої гармоніки  $k$ -го контура;

$\alpha_k$  - статорна кутова координата;

$\beta_{vk}$  - просторовий кут орієнтації  $v$ -ої гармоніки магнітного поля по відношенню до осі контура.

З урахуванням (3) векторне рівняння магнітного стану має вигляд

$$\mathbf{Q} \vec{F}_\delta[\vec{\Phi}_\delta] + \vec{F}_r[\vec{\Phi}] + \vec{F}_s[\vec{\Phi}] - \frac{1}{2} \frac{1}{p_1} \mathbf{Q} \mathbf{V}[\gamma] \mathbf{W} \vec{i} = 0, \quad (8)$$

де  $\gamma$  - кут повороту ротора, а квадратні дужки вказують на відповідні функціональні зв'язки.

Рівняння електричного стану, складені за законами Кірхгофа для електричних контурів статора й ротора (рис.1) при роботі генератора на активно-індуктивне навантаження, мають вигляд

$$\begin{aligned}
 p\Psi_A + (R_A + R_{HA})i_A + L_{HA}pi_A - p\Psi_B - (R_B + R_{HB})i_B - L_{HB}pi_B &= 0; \\
 p\Psi_A + (R_A + R_{HA})i_A + L_{HA}pi_A - p\Psi_C - (R_C + R_{HC})i_C - L_{HC}pi_C &= 0; \\
 i_A + i_B + i_C &= 0; \\
 p\Psi_x + R_x i_x + u_{vx} + p\Psi_S + R_S i_S &= 0; \\
 p\Psi_y + R_y i_y + u_{vy} + p\Psi_S + R_S i_S &= 0; \\
 p\Psi_z + R_z i_z + u_{vz} + p\Psi_S + R_S i_S &= 0; \\
 i_x + i_y + i_z - i_S &= 0; \\
 p\Psi_a + R_a i_a + u_{va} + p\Psi_F + R_F i_F &= 0; \\
 p\Psi_b + R_b i_b + u_{vb} + p\Psi_F + R_F i_F &= 0; \\
 p\Psi_c + R_c i_c + u_{vc} + p\Psi_F + R_F i_F &= 0; \\
 i_a + i_b + i_c - i_F &= 0; \\
 p\Psi_D + R_D i_D &= 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

де  $\Psi_j, i_j, R_j$  ( $j = A, B, C, x, y, z, S, a, b, c, F, D$ ) - відповідно, повні потокозчеплення, струми й активні опори обмоток машини;

$R_j, L_j$  ( $j = HA, HB, HC$ ) - відповідно, активні опори й індуктивності навантаження фаз статора;

$u_{vj}$  ( $j = x, y, z, a, b, c$ ) - напруги на вентилях,

$p = d/dt$  - оператор диференціювання за часом.

Представимо потокозчеплення  $k$ -ого контура у вигляді суми потокозчеплення розсіяння та робочого потокозчеплення, зумовленого магнітним полем у повітряному проміжку машини

$$\Psi_k = \Psi_{\sigma k} + \Psi_{\delta k} \tag{10}$$

Потокозчеплення розсіяння контурів є лінійними функціями струмів, їх визначення відоме з літературних джерел. Робоче потокозчеплення  $k$ -го контура визначимо за формулою

$$\Psi_{\delta k} = w_k \frac{l \tau_1}{\pi} \int_0^\pi B \omega_k d\eta, \tag{11}$$

де  $w_k$  - кількість витків  $k$ -го контура;

$\tau_1, l$  - полюсна поділлка, яка відповідає меншій кількості пар полюсів  $p_1$ ,  $i$  довжина магнітопровода машини;

$B$  - значення індукції в точці розточки якоря з кутовою координатою  $\eta$  ( $0 \leq \eta \leq \pi$ ).

Зупинимось на обчисленні інтеграла (11). Якщо полюсну поділлку  $\tau_1$  розбити на  $n$  ділянок ( $n = 20+30$ ), то індукцію  $B$  в межах кож-

ної з них можна вважати постійною, а інтеграл (11) замінити сумою

$$\Psi_{\delta k} = w_k \frac{l \tau_1}{\pi} \frac{\pi}{n} \sum_{j=1}^n B_j \psi_{kj} = w_k \sum_{j=1}^n \Phi_{\delta j} \psi_{kj}, \quad (12)$$

де  $\Phi_{\delta j}$  - магнітний потік, який замикається через повітряний проміжок в межах  $j$ -ої елементарної ділянки розточки статора площею  $S_j = l\tau_1/\pi$ . Він визначається шляхом розрахунку магнітного кола БСГС, заступна схема якого представлена на рис. 2.

З урахуванням (12) потокозчеплення контурів БСГС визначаються за формулою

$$\vec{\Psi} = L_{\sigma} \vec{i} + \mathbf{W} \mathbf{V}_r \mathbf{Q}_r \vec{\Phi}, \quad (13)$$

де  $\vec{\Psi} = (\Psi_A, \Psi_{B'}, \Psi_C, \Psi_{x'}, \Psi_{y'}, \Psi_z, \Psi_S, \Psi_a, \Psi_{b'}, \Psi_c, \Psi_F, \Psi_D)_r$  - вектор повних потокозчеплень усіх контурів;

$L_{\sigma}$  - квадратна матриця індуктивностей розсіяння усіх контурів;

$\vec{\Phi} = (\Phi_1, \dots, \Phi_n)_r$  - вектор-стовпець контурних потоків заступної схеми магнітопровода (рис. 2).

Електромагнітний момент, який діє на статор, дорівнює

$$M = 2p_1 \frac{D_1}{2} \frac{\pi}{\alpha} \int_0^{\alpha} dG_{\eta}, \quad (14)$$

де  $dG_{\eta} = l_{\delta} B_{\eta} A_{\eta} d\eta$  - сила, яка діє на розрахунковий сектор статора з роторною координатою  $\eta$  і нескінченно малим кутовим розміром  $d\eta$  для будь-якого моменту часу при фіксованих значеннях кута  $\gamma$  і струмів  $\vec{i}$ ;

$A_{\eta} = dT_{\epsilon} \eta / d\eta$  - значення кутового струмового навантаження статора у точці  $\eta$ .

Після заміни інтеграла (14) сумою одержуємо

$$M = p_1 \sum_{k=1}^k \left[ w_k i_k \sum_{j=1}^n \left[ \Phi_{\delta j} \frac{d\psi_k}{d\alpha} \Big|_j \right] \right]. \quad (15)$$

У матричному записі цю формулу можна записати так

$$M = p_1 \mathbf{Q}_r \vec{\Phi} \mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{V}_{rs} \mathbf{W}_{\epsilon} \vec{i}_{\epsilon}, \quad (16)$$

де  $\mathbf{W}_{\epsilon} = \text{diag}(w_A, w_{B'}, w_C, w_{x'}, w_{y'}, w_z, w_S)$  - діагональна матриця кількостей витків статорних контурів;

$\vec{i}_{\epsilon} = (i_A, i_{B'}, i_C, i_{x'}, i_{y'}, i_z, i_S)_r$  - вектор миттєвих значень струмів статорних контурів;

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos n_1 \sin \eta_1 & \cos 3n_1 \sin 3\eta_1 & \dots & \cos m n_1 \sin m \eta_1 \\ \cos n_n \sin \eta_n & \cos 3n_n \sin 3\eta_n & \dots & \cos m n_n \sin m \eta_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

- матриця гармонійних перетворень ( $m$  - порядок найвищої гармоніки



контурах машини рівняння, які описують процеси в ньому, нелінійні. Розв'язування цих рівнянь здійснюємо чисельними методами з застосуванням ЕОМ.

Для розрахунку перехідного процесу в БСГС з застосуванням явних методів чисельного інтегрування диференційних рівнянь необхідно на кожному кроці (підкроці) розв'язувати відносно вектора похідних  $\vec{di}/dt$  систему рівнянь електричного стану. Вентиль апроксимується (R-L)-гілкою, параметри якої змінюють свої значення від мінімальних  $R_{\min}$ ,  $L_{\min}$  - у відкритому стані до максимальних  $R_{\max}$ ,  $L_{\max}$  - у закритому стані. Закривання вентилу настає в момент, коли залежність його струму від часу проходить через нуль від додатнього значення до від'ємного, а його відкривання проходить в момент подачі відпираючого імпульсу, за умови що напруга на (R-L)-гілці додатня. Відшукування моментів комутації вентилів досягається шляхом застосування методу інвертування системи диференційних нелінійних рівнянь. Диференційні індуктивності визначаються за формулою (21), а коефіцієнти е.р.с. обертання за формулою (23). При цьому вектор  $\vec{\Phi}$  магнітних потоків та матриця  $\mathbf{Y}$  диференційних магнітних опорів, які входять у формули (21) і (23), для кожного нового значення вектора  $\vec{i}$  струмів визначаються шляхом розрахунку магнітного кола БСГС. Оскільки система рівнянь, яка його описує нелінійна, розв'язок її виконується ітераційним методом Ньютона. З використанням описаного вище алгоритму розроблена програма розрахунку перехідних процесів в БСГС.

Наявність в електричних колах вентилів, провідність яких при їх комутації змінюється у багато разів (на декілька порядків), призводить до того, що задача розрахунку перехідного процесу стає "жорсткою". При розв'язуванні задачі явним методом це призводить до дроблення кроку  $i$ , як наслідок, великих затрат машинного часу. Для усунення цієї проблеми в дисертації розроблено алгоритм розрахунку перехідних процесів неявним методом формул диференціювання назад (ФДН). При цьому вентилі в розрахункових моделях замінюються активним опором  $R$ , який стрибкоподібно змінює своє значення від мінімального  $R_{\min}$  у відкритому стані до максимального  $R_{\max}$  у закритому стані ( $R_{\min}$  приймається на декілька порядків меншим, а  $R_{\max}$  на декілька порядків більшим від активного опору гілки з вентилем). Вихідна система алгебро-диференційних рівнянь для розрахунку перехідних електромагнітних процесів в БСГС складається з рівнянь магнітного (8) та електричного станів (9) і формул для

визначення поточкозчеплень контурів (13). В системі рівнянь електричного стану похідні поточкозчеплень і струмів апроксимуються за допомогою  $\rho$ -точкової ( $\rho = 2, 3, 4, 5$ ) різницевої формули, яка дає наближене значення похідної в останній точці. Розв'язування одержаної нелінійної системи алгебричних рівнянь здійснюється ітераційним методом Ньютона. Момент комутації вентиля встановлюється порівнянням знаків значень струмів у двох останніх точках.

В роботі описаний алгоритм розрахунку усталеного режиму диференціальним гармонічним методом, який дозволяє здійснити розрахунок усталеного режиму без розрахунку перехідного процесу. Цей метод ефективний при проектуванні (особливо в задачах оптимізації) електричних машин. Згідно з цим методом шукані величини – напруги, струми, поточкозчеплення – замінюються їх розкладами многочленами Фур'є. Амплітуди гармонік цих многочленів є величинами, що визначаються. Вихідна система нелінійних диференціальних рівнянь (9) (періодичний розв'язок якої визначається), перетворюється в нелінійну систему алгебричних рівнянь. Перетворення виконується за наступним правилом: змінні величини замінюються на відповідні їм вектори амплітуд, а операція диференціювання – на множення зліва кутової частоти першої гармоніки та матриці диференціювання. Для визначення кореня одержаної нелінійної системи алгебричних рівнянь використовується метод Ньютона.

В четвертому розділі наведені результати математичних та експериментальних досліджень БСГС.

Щоб можна було рекомендувати описану вище математичну модель БСГС для використання у процесі проектування як самої БСГС, так і її системи керування, необхідно цю модель всесторонньо протестувати. Це тестування полягало у створенні макетного взірця БСГС, його експериментальному дослідженні, проведенні математичного експерименту з використанням пакету програм, що реалізує математичну модель БСГС, і порівнянні розрахункових та експериментальних даних. Останнє і дало можливість зробити висновки щодо правомірності прийнятих допущень і адекватності математичної моделі.

Макетний взірець виготовлений на базі серійного асинхронного двигуна з фазним ротором АК-51/6 потужністю 2.8 кВт. На ньому проведені дослідження характеристик неробочого ходу, зовнішніх, регульовальних (окремо для генератора і збудника), а також при їх сумісній роботі в трифазному режимі при різних коефіцієнтах потужності. Дані дослідження показали, що БСГС володіє всіма властивостями звичайних синхронних машин. Порівняння розрахункових залеж-

ностей й експериментальних осцилограм вихідної напруги, струму якоря та струму збудження дозволяє зробити висновок про правомірність прийнятих допущень і адекватність математичної моделі макетному взірцю. Розходження розрахункових даних з результатами експерименту не перевищують 10%.

На математичній моделі досліджено вплив насичення магнітопровода на електромагнітні процеси, які протікають в БСГС. Це дослідження проводилось на БСГС, виконаному на базі синхронного генератора СГД-2-250 ( $S = 250$  кВА,  $p_1 = 2$ ,  $U = 400$  В).

В додатках наведені тексти програм, які реалізують математичну модель БСГС та алгоритм розрахунку перехідних процесів явним методом Рунге-Кутта.

#### **Основні результати дисертаційної роботи:**

1. Важливим і перспективним напрямком дальшого вдосконалення синхронних генераторів, що використовуються автономними джерелами електричної енергії, є виконання генератора і збудника в єдиному магнітопроводі, тобто сумішеними.

2. На шляху створення безконтактних сумішених синхронних генераторів досягнуто певних успіхів, однак в даний час роботи в цьому напрямі обмежуються, як правило, різноманітними пропозиціями по їх конструктивному виконанню, що зафіксовано рядом авторських свідоцтв, кількість яких продовжує зростати. Перевірити їх працездатність в експлуатаційних режимах та спрогнозувати їх техніко-економічні показники практично немає можливості, оскільки фізичне моделювання вимагає великих матеріальних витрат і потребує багато часу, а достовірні універсальні математичні моделі відсутні.

3. Основним недоліком відомих методів аналізу процесів в безконтактних сумішених синхронних генераторах є спроба розглядати електромагнітні зв'язки між його обмотками на базі лінійної теорії електричних машин. Ці методи не враховують електромагнітних зв'язків між обмотками з різною кількістю пар полюсів, що виникають внаслідок насичення магнітопровода.

4. Електромагнітні зв'язки в БСГС з високою точністю можуть бути враховані на основі розрахунку магнітного поля в повітряному проміжку машини. Як показали дослідження, достатня точність розрахунків при порівняно невеликих об'ємах обчислень може бути досягнута при представленні магнітопровода машини запропонованою у роботі розгалуженою заступною схемою.

5. В дисертації з позиції нелінійної теорії електричних машин

розроблена математична модель БСГС високого рівня адекватності, яка враховує реальний розподіл намагнічувальних сил його обмоток, насичення ділянок магнітопровода та, як наслідок, взаємоіндуктивні зв'язки між обмотками з різною кількістю пар полюсів. В основу математичної моделі покладена система рівнянь електричного стану обмоток статора та ротора, записана в жорстко зв'язаних з ротором осях, та система рівнянь магнітного стану, складена для заступної схеми магнітопровода за методом контурних потоків.

6. Розроблений алгоритм розрахунку координат магнітного стану БСГС, оснований на розв'язуванні нелінійного векторного рівняння магнітного стану ітераційним методом Ньютона. Даний алгоритм і розроблена на його базі програма оптимізовані і враховують слабку заповненість матриці Якобі розв'язуваної системи рівнянь.

7. Розроблені алгоритм і програма розрахунку матриці диференційних індуктивностей, вектора е.р.с. обертання й електромагнітного моменту БСГС. Цей алгоритм є сумішений з алгоритмом розрахунку координат магнітного стану (використовує матрицю диференційних магнітних опорів і вектор магнітних потоків з останньої ітерації розв'язування векторного нелінійного алгебричного рівняння магнітного стану).

8. Розроблені алгоритм і програма розрахунку перехідних процесів у БСГС явним методом чисельного інтегрування рівнянь електричного стану. Вентилі при цьому апроксимуються (R-L)-гілками, а відшукання моментів комутації досягається шляхом інвертування системи рівнянь електричного стану.

9. Розроблені алгоритм і програма розрахунку перехідних процесів у БСГС неявним методом чисельного інтегрування рівнянь електричного та магнітного станів. Вентилі в математичній моделі замінюються активними опорами, алгебризація диференційних рівнянь здійснюється за допомогою п'ятиточкової різницевої формули, а їх розв'язування проводиться ітераційним методом Ньютона.

10. Розроблений алгоритм розрахунку усталеного режиму БСГС диференційним гармонічним методом, який дозволяє здійснити розрахунок усталеного режиму без розрахунку перехідного процесу, що істотно скорочує машинний час розрахунку.

11. На базі створених програм здійснений розширений математичний експеримент з дослідження усталених режимів роботи та перехідних процесів БСГС.

12. Проведене експериментальне дослідження макетного взірця показало правомірність прийнятих допущень та адекватність запропо-

нованої моделі БСГС реальним електромагнітним процесам.

13. Математичне й експериментальне дослідження макетного візря дало змогу дослідити і сформулювати умови самозбудження безконтактних синхронних генераторів сумішеного виконання.

14. Розроблену математичну модель та пакет програм доцільно використовувати окремими модулями в САПР такого класу машин.

Виконані теоретичні дослідження дали змогу проаналізувати ряд відомих рішень по створенню БСГС і запропонувати новий варіант, який має ряд переваг в порівнянні з існуючими. На цей варіант одержано позитивне рішення на проведення попередньої експертизи і про можливість видання патенту України.

**Основні результати дисертації відображені в наступних роботах:**

1. Глухівський Л.Я., Маляр В.С., Хай М.В. Електромагнітні параметри безконтактної сумішеної неявнополюсної машини //Технічна електродинаміка. - 1995. - №1-2. - С.25-29.

2. Глухівський Л.Я., Маляр В.С., Хай М.В. Математична модель безконтактного синхронного генератора сумішеного виконання і її програмна реалізація //Деп. в ГНТБ України 15.11.93. № 2251-Ук 93. - 25 с.

3. Глухівский Л.И., Маляр В.С., Хай М.В. Математическое моделирование переходных процессов в бесконтактном совмещенном синхронном генераторе //Известия вузов СНГ. Энергетика. 1995. - №5-6.

4. Глухівський Л., Маляр В., Хай М. Розрахунок електромагнетних процесів у синхронному генераторі зі сумішеним збудником //Тези доп. 1-ої Міжн. наук-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці". - Львів, 1995. - С.113-114.

5. Хай М.В. До чисельного аналізу електромашинно-вентильних кіл //Вісник ЛПІ: Електроенергетичні й електромеханічні системи. - 1994. - №279.

6. Глухівський Л.Я., Маляр В.С., Осідач Ю.В., Хай М.В. Безконтактна синхронна машина /Заявка на винахід, вхідний № В3704470\02\1442, № реєстрації 93005795 від 30.06.93.

**Особистий внесок автора.** В публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: в [1], [3] - розробка алгоритмів, комп'ютерних програм і виконання математичних експериментів; у [2] - створення математичної моделі та її програмна реалізація.

#### Аннотация

Хай М.В. Математическое моделирование бесконтактных синхронных генераторов совмещенного исполнения.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины, Государственный университет “Львовская политехника”, Львов, 1995.

Защищается рукопись, сущность которой отражена в 5 научных работах, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования бесконтактных синхронных генераторов совмещенного исполнения. Разработаны математическая модель, учитывающая электромагнитные связи между обмотками с различными числами пар полюсов и базирующаяся на представлении магнитопровода машины разветвленной нелинейной схемой замещения. Приведены алгоритмы, программы и результаты расчета переходных процессов и установившихся режимов работы.

#### Abstract

Hay M.V. Mathematical simulation of noncontact brushless synchronous generators of combined performance.

This thesis proposal is being presented in defence of the following Candidate Dissertation: 05.09.01 – Electrical Devices, Lviv State Politechnical University, Lviv 1996.

The manuscript is defended, the essence of which is described in five scientific works which contains theoretical and experimental studies of noncontact brushless synchronous generators of combined performance. A mathematical model was developed which takes into consideration the connections between windings which have different pairs of poles and is based on the device's magnetic circuit's presentation by means of a ramified non-linear scheme of equivalent circuits. Algorithmic computer programs and computed results of transient and steady state processes are being presented as well.

*Ключові слова:* електрична машина, синхронний генератор, сумішений, безконтактний, математична модель.

*Хай М*

112 142

AB 34.076