

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Іссам Хуссейн Шахін

УДК 621.313.32:621.318.13

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ  
У МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРАХ  
ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТИ МАГНІТНОТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.09.01 - Електричні машини і апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному політехнічному університеті Міністерства освіти України.

- Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент  
Іваненко Віталій Микитович,  
Харківський державний політехнічний  
університет,  
доцент кафедри електричних машин.
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
Повстень Віктор Олександрович,  
Київський міжнародний університет  
цивільної авіації,  
завідувач кафедри електромеханіки;  
  
доктор технічних наук  
Зозулін Юрій Васильович,  
Науково-дослідний, проектно-  
конструкторський і технологічний інститут  
важкого електромашинобудування, м. Харків,  
головний науковий співробітник,  
заступник головного конструктора.
- Провідна установа - Інститут електродинаміки  
НАН України, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться 16 березня 2000 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Харківському державному політехнічному університеті за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий 28 січня 2000 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність проблеми.** Використання синхронних генераторів магнітоелектричного збудження як автономних джерел електроживлення є перспективним, тому що такі генератори мають повну безконтактність, високі енергетичні та масогабаритні показники, високі магнітні та енергетичні характеристики сучасних магнітних матеріалів при відносно невеликій їх вартості, високу надійність. До цього слід додати простоту їх обслуговування в експлуатації та можливість створення ремонтопридатних конструкцій індукторів.

Ряд питань, пов'язаних з особливостями роботи синхронних генераторів з постійними магнітами (СПМ), вимагає більш детального аналізу, особливо це стосується роботи генераторів у нестационарних режимах.

Як відомо, об'єм постійних магнітів, а значить маса і вартість генератора, залежить, при інших рівних умовах, перш за все від величини коефіцієнта ударності, визначеного в режимі раптового короткого замикання (РКЗ), і правильний вибір його на етапі проектування має важливе значення. У відомій технічній літературі коефіцієнт ударності, який рекомендується при розрахунку маси постійних магнітів, визначається в режимі РКЗ при постійній частоті обертання ротора. У випадку малих моментів інерції обертових мас, що має місце при роботі генератора від привідного двигуна сумірної потужності, розв'язання задачі при постійній частоті обертання може розглядатися як перше наближення до розв'язання задачі загального випадку. Реальні перехідні процеси завжди супроводжуються зміною частоти обертання ротора, що необхідно враховувати у математичній моделі генератора.

Важливим фактором, що впливає на властивості генератора, є геометрія полюсного наконечника, яка забезпечує отримання або мінімального коефіцієнта ударності, або коефіцієнта, незалежного від параметрів поздовжнього контуру генератора в деякому діапазоні їх зміни, що дуже важливо на етапі проектування.

Однією з основних задач проектування СПМ є якомога точне врахування магнітних потоків розсіювання між активними поверхнями магнітів, що має особливе значення, коли розв'язується задача оптимізації магніту за величиною максимальної енергії або за величиною максимальної потужності генератора.

У таких випадках отримати зазначені результати можливо тільки регулюванням потоків розсіювання, що в свою чергу пов'язано з відповідною зміною геометрії усєї магнітної системи. Найбільш точне врахування потоків розсіювання генератора можливо отримати шляхом розв'язання задачі розподілу реального магнітного поля в міжполюсному просторі генератора.

Роботи по створенню уточнених методик розрахунку і дослідженню робочих властивостей СПМ на протязі кількох років проводились кафедрою електричних машин Харківського державного політехнічного університету (ХДПУ). Кінцевою метою цих робіт була розробка

рекомендацій щодо проектування синхронних генераторів магнітоелектричного збудження з урахуванням перехідних режимів, що мають місце в умовах експлуатації цих машин. Дослідження, що проведені у дисертаційній роботі, та одержані результати є кінцевим етапом науково-дослідної роботи кафедри за цією темою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Необхідність досліджень, які проводились у дисертаційній роботі, викликана вимогою створення високоефективних і надійних джерел живлення та зменшення витрати активних матеріалів. Ці дослідження пов'язані з науково-дослідною роботою кафедри електричних машин ХДПУ за темою М 3211 “Розробка уточнених багаторівневих математичних моделей, що забезпечують оптимальний вибір параметрів електричних машин при їх проектуванні з метою підвищення енергетичних показників”, яка виконується згідно з координаційним планом Міністерства освіти України (наказ № 37 від 13.02.97 р.), ДР № 0197U001921.

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є врахування нестационарних режимів роботи СГПМ на етапі проектування для поліпшення їх робочих властивостей.

Досягнення зазначеної мети передбачало розв'язання таких завдань:

- розробка уточненої математичної моделі СГПМ з урахуванням змінної частоти обертання й конструктивного виконання ротора генератора;
- оцінка впливу параметрів обмотки статора і демпферних контурів ротора на величину коефіцієнта ударності;
- розробка методики розрахунку геометрії полюсної системи ротора за результатами математичного моделювання режиму РКЗ;
- аналітичний розрахунок розподілу магнітного поля в робочому зазорі і в міжполюсному просторі генератора з метою визначення коефіцієнта розсіювання магнітної системи ротора;
- експериментальне дослідження макетного зразка СГПМ з метою перевірки вірогідності теоретичних і розрахункових передумов;
- розробка рекомендацій щодо проектування і створення СГПМ при їх роботі на автономне навантаження.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- розроблена уточнена математична модель СГПМ з урахуванням нерівномірності обертання й конструктивного виконання ротора генератора;
- запропонований закон зміни моменту привідного двигуна, який забезпечує зв'язок між електромагнітним моментом генератора у сталому режимі і змінною частотою обертання ротора;

– проведена оцінка впливу параметрів обмотки статора і демпферних контурів ротора на величину коефіцієнта ударності і наведені рекомендації щодо вибору його величини з урахуванням конструктивного виконання ротора і потужності генератора;

– розроблена методика розрахунку геометрії полюсних наконечників для отримання заданого рівня коефіцієнта ударності з використанням теорії комплексного магнітного опору;

– з метою визначення коефіцієнта розсіювання магніту проведено розрахунок магнітного поля генератора з використанням комбінованого методу - метод Фур'є для розрахунку поля в робочому зазорі генератора і метод Рітца для розрахунку поля в міжполюсному просторі.

**Практичне значення** дисертаційної роботи полягає у створенні методик та алгоритмів розрахунку СГПМ, які дозволяють на етапі проектування здійснювати вибір основних параметрів генератора, при яких забезпечується надійна робота постійних магнітів ротора у сталих та нестационарних режимах.

Зазначені методики та алгоритми розрахунку впроваджено на фірмі “Mascomest” (Республіка Ліван, м. Бейрут). Одержані в роботі теоретичні та практичні результати також можуть бути використані на підприємствах і в установах, які займаються розробкою та створенням СГПМ, що використовуються як автономні джерела живлення.

**Особистий внесок здобувача** в отримання наукових результатів, які виносяться на захист:

– уточнена математична модель синхронного генератора магнітоелектричного збудження в нестационарних режимах;

– алгоритм розрахунку магнітного поля в робочому просторі синхронного генератора магнітоелектричного збудження;

– методика розрахунку геометрії полюсного наконечника синхронного генератора та вибір оптимальних коефіцієнтів ударності синхронного генератора при збудженні від постійних магнітів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на двох міжнародних конференціях “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье (м. Харків, Мішкольц, Магдебург, 1995, 1996 рр.); на наукових семінарах НАН України з комплексних проблем “Наукові основи електроенергетики”; на наукових конференціях професорсько-викладацького складу ХДПУ в 1994-1999 рр.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 9 роботах: 7 статей - у Віснику Харківського державного політехнічного університету; 2 тези доповідей на міжнародних конференціях (м. Харків, Мішкольц, Магдебург).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів тексту з висновками по кожному розділу, висновку, списку літератури і трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 246 сторінок, у тому числі 147 сторінок основного тексту, 6 таблиць на 2 сторінках, 100 рисунків на 62 сторінках, список літератури з 64 найменувань на 6 сторінках і 3 додатки на 29 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі роботи, викладено наукову новизну, практичну значущість одержаних результатів.

**Перший розділ** присвячений аналізу характеристик джерел електроживлення для автономних електроустановок. Проведено порівняння експлуатаційних характеристик відомих електромашинних джерел живлення з метою визначення типу генератора, що відповідає поставленим вимогам. Аналіз показав, що для установок малої та середньої потужності найбільш перспективним може бути застосування безконтактних магнітоелектричних синхронних генераторів.

Проведений аналіз магнітних властивостей відомого спектра магнітних матеріалів показав, що для забезпечення високих енергетичних та масогабаритних характеристик електричних машин при відносно невеликій їх вартості слід використовувати постійні магніти (ПМ) на основі рідкісноземельних металів, причому перевагу слід віддавати використанню магнітів класу неодим-залізо-бор.

З урахуванням специфіки роботи генераторів потрібно використовувати ремонтпридатні технологічні конструкції з полюсними наконечниками чи без них, для яких можливе повне чи часткове розбирання ротора з мінімальними витратами коштів та часу. Подібні конструкції розроблені на кафедрі електричних машин ХДПУ.

**У другому розділі** розглядаються питання математичного моделювання синхронних генераторів з постійними магнітами.

При складанні математичної моделі розглядається синхронний трифазний генератор, ротор якого явнополюсний з ПМ і двома демпферними еквівалентними контурами по поздовжній та поперечній осям, які характеризують дію полюсних наконечників або алюмінієвої заливки.

Основою для дослідження нестационарних режимів синхронних машин незалежно від способу збудження є система рівнянь, яка записана в координатах ротора. Такій системі рівнянь відповідає просторова модель перетвореного синхронного генератора з ПМ, яку наведено на рис. 1.

У математичній моделі ПМ являє собою фіктивний одновитковий контур, приєднаний до джерела струму, величина якого залишається незмінною при всіх режимах роботи генератора. За такого уявлення контур ПМ не збуджує ЕРС трансформації в інших контурах і струм від ЕРС взаємоіндукції у цьому контурі дорівнює нулю, бо джерело струму має великий внутрішній опір. Останнє дає можливість одержати незалежне від решти рівнянь рівняння, яке дозволяє визначити величину результуючого потоку по поздовжній осі генератора у перехідних режимах. Тоді повна система диференціальних рівнянь СГПМ у відносних одиницях матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 |U| &= |X| \cdot |I_\tau|; \\
 M &= H_j p_\tau S + M_0 + \Psi_q i_d - \Psi_d i_q; \\
 \Phi_i &= \tilde{\sigma}_{i d} i_d + x_{i y d} i_{y d} + \tilde{\sigma}'_i i'_i,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де

$$|U| = \begin{vmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \\ U_{d2} \\ U_{q2} \end{vmatrix}; \quad |\tilde{O}| = \begin{vmatrix} x_d & 0 & x_d y_d & 0 \\ 0 & x_q & 0 & x_q y_q \\ x_d y_d & 0 & \tilde{\sigma}_{y d} & 0 \\ 0 & x_q y_q & 0 & \tilde{\sigma}_{y q} \end{vmatrix}; \quad |I_\tau| = p_\tau \begin{vmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{y d} \\ i_{y q} \end{vmatrix}; \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= -U_d + r_1 i_d - x_q i_q + S - x_q y_q i_{y q} + S; \\
 U_{q1} &= -1 + S - x_d i_d + x_d y_d i_{y d} + x_{i d} i'_i - U_q - r_1 i_q; \\
 U_{d2} &= -r_{y d} i_{y d}; \quad U_{q2} = -r_{y q} i_{y q};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$x'_i$  - індуктивний опір еквівалентного контуру ПМ

$I'_i$  - струм еквівалентного контуру ПМ;

$p_\tau$  - символ диференціювання;

$S$  - від'ємне ковзання у перехідних режимах.

Враховуючи те, що генератор працює з привідним двигуном сумірної потужності, необхідно задати характер зміни моменту двигуна в перехідних режимах таким чином, щоб він змінював свій момент за всякої зміни електромагнітного моменту генератора. Був запропонований такий закон зміни моменту привідного двигуна:

$$M = \frac{M_{y0}}{1 + S}, \tag{4}$$

де  $M_{\gamma_0}$  - електромагнітний момент генератора, визначений при  $\omega = 1$  для кожного сполучення параметрів системи рівнянь.

В основу розрахунку параметрів генератора покладені схеми заміщення магнітного кола по поздовжній та поперечній осям, в яких демпфірувальна дія полюсних наконечників враховується введенням до схем еквівалентних магнітних та електричних опорів.

Повна індуктивність контурів генератора визначалась за такими співвідношеннями:

$$L_i = W_i \Lambda_i^2, \quad (5)$$

де  $W_i$  - ефективне число витків  $i$ -го контуру;

$\Lambda_i$  - провідність магнітному потоку  $i$ -го контуру.

Взаємні індуктивності між контурами розраховувались за співвідношенням

$$M_{j,i} = W_j W_i \Lambda_{j,i}, \quad (6)$$

де  $\Lambda_{j,i}$  - взаємна провідність між гілками  $j$  та  $i$ .

Для визначення магнітних та електричних параметрів масивних полюсних наконечників була використана методика, в основу якої покладено поняття комплексного магнітного опору.

Згідно з цією методикою магнітний опір полюсного наконечника дорівнює:

$$R'_{\gamma_d, \gamma_q} = 1,13 \frac{\ell}{u} \sqrt{\frac{\gamma f}{\mu_a}} \left( 1 + S_{-} \right), \quad (7)$$

де  $\ell$  - еквівалентна довжина магнітного кола в напрямку лінії вектора магнітної індукції;

$u$  - периметр поперечного перерізу ділянки магнітного кола.

Еквівалентний активний опір одновиткового демпферного контуру дорівнює:

$$r_{\gamma_d, \gamma_q} = 2,5 \frac{\ell'}{u'} \sqrt{\frac{\mu_a f}{\gamma}} \left( 1 + S_{-} \right), \quad (8)$$

де  $\ell' = u$ ;  $u' = 2\ell$ .

**Третій розділ** присвячений аналізу результатів математичного моделювання нестационарних режимів роботи СГПМ.

Розглянуто режим РКЗ генератора як найбільш небезпечний в експлуатаційних умовах для двох конструктивних виконань ротора з призматичними магнітами - з полюсними наконечниками та без них. При відсутності полюсних наконечників змінюваними параметрами були активний опір обмотки статора, синхронний індуктивний опір та електромеханічна стала часу. У процесі рішення досліджувався вплив цих параметрів на величину максимальних викидів струму, електромагнітного моменту та коефіцієнта ударності для сталої та змінної частоти обертання.



Характер зміни струму статора й електромагнітного моменту при сталій та змінній частотах обертання підпорядковується одній закономірності, але максимальні викиди при змінній частоті обертання зменшуються, причому це зменшення тим більше, чим менше величина активного опору обмотки статора. При значеннях  $r_1 = 0,03 \div 0,05$  зменшення максимальних струмів сягає 10-15 %. Останнє пояснюється зниженням ЕРС обмотки статора (ковзання ротора в перші моменти РКЗ досягає 20 %) і збільшенням сталої часу електричного кола статора.

Вплив змінної частоти обертання в області малих активних і синхронних поздовжніх індуктивних опорів спричинює зменшення коефіцієнта ударності ( $K_{уд}$ ) на 10-15 %, що з урахуванням високої вартості магнітотвердих матеріалів має братися до уваги при визначенні геометрії активної зони ротора генератора.

Рекомендації щодо вибору  $K_{уд}$ , які наведені в літературі з проектування СГПМ, подані безвідносно до потужності генератора. Проведені розрахунки дозволяють рекомендувати для генераторів потужністю до 10 кВт коефіцієнт ударності в межах  $K_{уд} = 1,1 \div 1,15$ , а для генераторів більшої потужності  $K_{уд} = 1,2 \div 1,25$ .

Для ефективного захисту магніту від розмагнічування необхідно, щоб стала часу демпферного контуру перевищувала час зміни зовнішнього потоку. З цього випливає важлива задача розрахунку геометрії полюсних наконечників, тобто їх електричних та магнітних параметрів, які забезпечують нормальну роботу генератора в перехідних режимах.

Як показали розрахунки, система рівнянь мало чутлива до зміни параметрів демпферного контуру по поперечній осі, тому при розв'язанні задачі змінювались лише параметри обмотки статора для двох осей та параметри демпферного контуру по поздовжній осі.

Порівняння характеру зміни струму статора з випадком відсутності полюсних наконечників показує збільшення максимальних викидів струму на 30-40 %, що пояснюється демпфірувальною дією контурів полюсних наконечників. Викиди струму при змінній частоті обертання зменшуються на 10-15 %. Величина максимальних викидів електромагнітного моменту збільшується в 1,5-2 рази, що спричинює різке зменшення частоти обертання на перших етапах РКЗ (ковзання ротора досягає значення 20-25 %), але в подальшому ці викиди й коливання частоти обертання зменшуються і ротор плавно входить до синхронізму (рис. 2).

Вибір правильної геометрії полюсних наконечників дає можливість отримати таку зміну магнітного потоку в поздовжній осі, що його мінімальна величина в процесі РКЗ не менше значення потоку в режимі сталого КЗ (рис. 3), що забезпечує величину  $K_{уд} \approx 1$ .

Як показують численні розрахунки, найбільший вплив на  $K_{уд}$  мають активний та індуктивний опори контуру полюсного наконечника -  $r_{эд}$  та  $x_{эд}$ . Збільшення цих опорів спричинює зниження ефективності демпфірування, і, коли  $r_{эд} > r_{эдн}$  ( $r_{эдн}$  - значення опору, яке забезпечує

$K_{уд}=1$ ), демпфірувальні властивості полюсного наконечника погіршуються і  $K_{уд}$  наближається до значення, що відповідає генераторам без полюсних наконечників.

Оптимальний вибір  $r_{эд}$  та  $x_{эд}$  дозволяє одержати значення  $K_{уд}$ , що наближається до одиниці, при будь-яких значеннях поздовжньої індуктивності генератора  $x_d$  безвідносно до рівня зміни частоти обертання ротора. Так, при зміні  $r_{эд}$  у межах  $0,05 \div 0,07$  при значенні  $x_{эд}$  на рівні  $0,4 \div 0,5$  величина  $K_{уд}=1$ . Зростання  $r_{эд}$  викликає збільшення впливу на  $K_{уд}$  змінної частоти обертання, для малих значень  $x_{эд}$  врахування цього впливу знижує  $K_{уд}$  на величину до 10 %.

Результати розрахунків дозволили побудувати залежності  $K_{уд}$  від параметрів еквівалентного поздовжнього контуру полюсного наконечника для заданого значення опору генератора  $x_d$ . Ряд таких характеристик наведено на рис. 4. Використовуючи подібні криві та теорію комплексного магнітного опору, можливо визначити на етапі проектування основні розміри полюсного наконечника. Повністю методику розрахунку викладено у дисертаційній роботі.

**Четвертий розділ** присвячений розрахунку магнітних потоків розсіювання роторів СГПМ.

Необхідність такого розрахунку зумовлена таким: величина потоку розсіювання при заданому потоку магніту визначає корисний потік; величина коефіцієнта розсіювання впливає на масу магнітного матеріалу; оптимізація магніту за його максимальною енергією або максимальною потужністю генератора можлива тільки шляхом регулювання потоків розсіювання.

Існуючі методики розрахунку провідностей розсіювання базуються на уявленні спрощеної картини розподілу магнітного поля, тому пряме розв'язання задачі розподілу поля має свої переваги.

Для генератора з висококоерцитивними ПМ при аналітичному розв'язанні можливо перейти від циліндричної системи координат до прямокутної, бо висота магніту для цих матеріалів невелика в порівнянні з радіальними розмірами машини.

Розрахункову область машини і розподіл магнітного потенціалу на межах цієї області наведено на рис. 5.

Розрахунок поля був проведений комбінованим методом: для області повітряного зазору *ofed* відшукується функція розподілу скалярного магнітного потенціалу, яка задовольняє рівнянню Лапласа, а для області міжполюсного простору *osba* розподіл скалярного магнітного потенціалу знаходиться шляхом розв'язання варіаційної задачі методом Рітца.

В результаті розв'язання одержані вирази для розрахунку коефіцієнта розсіювання магнітної системи ротора.

Корисний магнітний потік (межа *fe*):

$$\hat{O}_{nk} = \mu_0 b_k \frac{1}{\text{shk} \frac{2\pi\delta}{T}}. \quad (9)$$

Магнітний потік на межі  $cb$ :

$$\hat{O}_{cbk} = \mu_0 \left[ \varphi_m \frac{2}{b_i} - 2\tilde{N} \left( \frac{b_i}{2} \right)^2 \frac{h_i}{2} + 2\tilde{A} \left( \frac{b_i}{2} \right)^2 \frac{h_i^3}{2} \right]. \quad (10)$$

Магнітний потік на межі  $cd$ :

$$\hat{O}_{cdk} = \mu_0 b_k \frac{1}{\text{th} \frac{k\pi\delta}{\tau}} \cos k \frac{\pi}{\tau} \frac{bn}{2}. \quad (11)$$

Повний магнітний потік магніту:

$$\hat{O}_i = \hat{O}_{cbk} + \hat{O}_{cdk} + \hat{O}_m, \quad (12)$$

де  $\Phi_m$  - потік розсіювання з торцевої поверхні магніту.

Коефіцієнт розсіювання дорівнює:

$$\sigma_0 = \frac{\hat{O}_i}{\hat{O}_{nk}}. \quad (13)$$

За одержаними співвідношеннями були виконані розрахунки коефіцієнта розсіювання магніту в режимі холостого ходу для різних співвідношень геометричних розмірів магнітної системи.

Результати розрахунку для одного з варіантів наведено на рис. 6.

**У п'ятому розділі** розглянуті результати експериментальних досліджень СГПМ.

При виготовленні макетного зразка генератора були використані магнітна система, обмотка статора та конструктивні елементи серійного асинхронного двигуна (АИР112МВ6У3), що дозволило значно зменшити вартість зразка.

Задача проектування в такому випадку зводилась тільки до розрахунку індуктора з використанням магнітів на основі ферит-стронцію без полюсних наконечників. Це не дозволило в подальшому одержати оптимальні техніко-економічні показники, але дозволило провести порівняння розрахункових та дослідних даних.

Була проведена вся необхідна сукупність експериментів у сталих та перехідних режимах. Відхилення експериментальних значень ЕРС в режимі холостого ходу від розрахункових було на

рівні 5 %, номінальної напруги при активно-індуктивному навантаженні - до 10 %. Обробка осцилограм раптового симетричного короткого замикання дала значення  $K_{уд}=1,2$ , що збігається з вибраним при проектуванні.

Близький збіг дослідних і розрахункових даних свідчить про достовірність одержаних у роботі теоретичних і розрахункових результатів.

У додатках наведено програми розрахунку режиму РКЗ і коефіцієнтів розсіювання ротора генератора та акт впровадження.

## ВИСНОВКИ

1. Техніко-економічні характеристики СГПМ залежать від правильного вибору об'єму постійного магніту та геометрії полюсної системи індуктора. На етапі проектування генераторів мають бути задані чіткі рекомендації з урахуванням факторів, що впливають на робочі властивості генератора. Одним з них є коефіцієнт ударності, який визначається в режимі РКЗ. Рекомендації, які є в літературі, дають значення цього коефіцієнта при постійній частоті обертання ротора безвідносно до потужності генератора.

Для генераторів, які працюють від привідного двигуна сумірної потужності, розрахунок коефіцієнта ударності має бути виконаний з урахуванням змінної частоти обертання, що має місце при нестационарних режимах.

Ця задача розв'язується шляхом всебічного аналізу впливу параметрів генератора на коефіцієнт ударності за допомогою узагальненої математичної моделі з урахуванням нерівномірності обертання та конструктивного виконання ротора генератора.

Проведений аналіз показав, що при правильно вибраній геометрії полюсного наконечника можливо одержати мінімальне значення коефіцієнта ударності безвідносно до частоти обертання та величини поздовжньої індуктивності генератора.

2. Одержана уточнена математична модель СГПМ з урахуванням нерівномірності обертання та конструктивного виконання ротора, яка дозволяє досліджувати нестационарні режими, що мають місце в експлуатації. Запропонований закон зміни моменту привідного двигуна, який забезпечує зв'язок між електромагнітним моментом генератора в сталому режимі та змінною частотою обертання ротора.

3. Числовий аналіз режиму РКЗ показав, що врахування нерівномірності обертання ротора є обов'язковим, бо зменшення частоти обертання дає зменшення ударних струмів до 20 %, а коефіцієнта ударності до 10-15 %, що безпосередньо впливає на об'єм магнітного матеріалу та вартість генератора.

4. Показано, що правильний вибір геометрії полюсного наконечника дозволяє одержати оптимальний коефіцієнт ударності, що наближається до одиниці, безвідносно до частоти обертання та величини поздовжньої індуктивності генератора.

5. Розроблена методика розрахунку геометрії полюсного наконечника, яка дозволяє одержати заданий рівень коефіцієнта ударності з використанням теорії комплексного магнітного опору.

6. Одержаний аналітичний розв'язок задачі розподілу магнітного поля в генераторі з використанням комбінованого методу (метод Фур'є - метод Рітца).

7. Результати експериментальних досліджень макетного зразка генератора підтверджують достовірність розробленої методики розрахунку СГПМ.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Иссам Хуссейн Шахин. Расчет геометрии полюсного наконечника синхронного генератора магнитоэлектрического возбуждения // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 32.- С. 7-11.

2. Иссам Хуссейн Шахин. Выбор конструктивного исполнения и материала постоянных магнитов индукторов автономных синхронных генераторов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 32.- С. 22-24.

3. Иссам Хуссейн Шахин. Экспериментальное исследование макетного образца синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 37.- С. 122-126.

4. Иссам Хуссейн Шахин. Определение параметров ненасыщенных синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 59.- С. 55-57.

5. Иваненко В.Н., Иссам Хуссейн Шахин. Математическая модель синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 46.- С. 68-69.

Автором розроблена уточнена математична модель синхронного генератора магнітоелектричного збудження.

6. Новиков Ю.Д., Иваненко В.Н., Иссам Хуссейн Шахин. Расчет магнитного поля в межполюсном пространстве синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 47.- С. 84-85.

Автору належить постановка задачі та розробка алгоритму розрахунку магнітного поля.

7. Иваненко В.Н., Иссам Хуссейн Шахин. Расчет коэффициентов ударности синхронного генератора магнитоэлектрического возбуждения // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- 1999.- Вып. 55.- С. 90-91.

Автором проведені числові розрахунки коефіцієнта ударності синхронного генератора в нестационарних режимах.

8. Иваненко В.Н., Рогачев С.И., Егорова Г.Г., Иссам Хуссейн Шахин. Моделирование нестационарных режимов работы магнитоэлектрических синхронных генераторов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы междунар. науч.-техн. конф., 19-21 апреля 1995 г.- Харьков, Мишкольц: ХГПУ, МУ, 1995.- Ч. 2.- С. 11.

Автору належить постановка задачі та математичне обґрунтування напрямку досліджень.

9. Иваненко В.Н., Рогачев С.И., Осташевский Н.А., Окунев С.И., Иссам Хуссейн Шахин. Влияние неравномерности вращения на коэффициент ударности синхронного магнитоэлектрического генератора // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы междунар. науч.-техн. конф., 30-31 мая 1996 г.- Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ, 1996.- Ч. 1.- С. 78.

Автором розроблена методика розрахунку коефіцієнта ударності синхронного генератора в нестационарних режимах.

### **АНОТАЦІЇ**

Иссам Хуссейн Шахин. Моделирование та аналіз перехідних процесів у магнітоелектричних синхронних генераторах для зменшення витрати магнітотвердих матеріалів.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - електричні машини і апарати. Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

Дисертація присвячена питанням дослідження перехідних режимів синхронних генераторів з постійними магнітами (СГПМ), які мають місце в умовах експлуатації. Розроблена математична модель СГПМ дозволяє в режимі раптового короткого замикання оцінити вплив параметрів генератора на величину коефіцієнта ударності, який визначає масо-габаритні показники та вартість генератора. Розроблена методика розрахунку геометрії полюсних наконечників дає можливість на етапі проектування отримати мінімальний або заданий коефіцієнт ударності. Аналітичне розв'язання задачі розподілу магнітного поля в робочому зазорі генератора дозволяє оцінити величину коефіцієнта розсіювання залежно від геометрії полюсної системи індуктора.

Ключові слова: синхронний генератор, постійні магніти, перехідні режими, коефіцієнт ударності, магнітне поле, заощадження активних матеріалів.

Issam Hussayn Shahin. The modelling and analysis of transient processes in magneto-electric synchronous generators for the decrease of consumption of magneto-rigid materials.- Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of sciences on a speciality 05.09.01 - electrical machines and apparatus. The Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1999.

The dissertation is devoted to questions of research of transitive modes of synchronous generators with constant magnets (SGCM), having a place under operating conditions. The developed mathematical model SGCM, allows in a mode of sudden short circuit to estimate influence of parameters of the generator on size of factor blow, which is determined by weight - dimensional parameters and cost of the generator. The developed technique of account of geometry poles of tips enables on a design stage to receive minimal or given factor blow. Analytical the decision of a task of distribution of a magnetic field in a working backlash of the generator allows to estimate size of factor of dispersion depending on geometry pole of system inductor.

Key words: the synchronous generator, constant magnets, transitive modes, factor blow, magnetic field, economies of active materials.

Иссам Хуссейн Шахин. Моделирование и анализ переходных процессов в магнитоэлектрических синхронных генераторах для уменьшения расхода магнитотвердых материалов.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины и аппараты. Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1999.

Диссертационная работа посвящена исследованию переходных процессов синхронных генераторов магнитоэлектрического возбуждения с использованием математической модели, построенной с применением теории обобщенной электрической машины. Целью исследований является оценка величины коэффициента ударности в режиме внезапного короткого замыкания (ВКЗ) при работе автономного синхронного генератора с приводным двигателем соизмеримой мощности. В связи с изменением в процессе ВКЗ величины момента приводного двигателя предложен закон его изменения, связывающий электромагнитный момент генератора в установившемся режиме с переменной частотой вращения ротора.

Исследовано влияние параметров обмотки статора и параметров демпферной системы (массивных полюсных наконечников) на величину всплесков тока обмотки статора, степень демпфирования продольного потока полюсными наконечниками, что и определяет величину

коэффициента ударности. Численный анализ показал, что учет неравномерности вращения ротора обязателен, так как уменьшение частоты вращения приводит к снижению ударных токов, а значит, коэффициентов ударности, что непосредственно влияет на объем магнитного материала и стоимость генератора. Показано, что наибольшее влияние на величину коэффициента ударности оказывают параметры продольного эквивалентного контура полюсного наконечника. Даны рекомендации по выбору коэффициента ударности в зависимости от мощности синхронного генератора и конструкции его полюсной системы. Расчеты показали, что правильный выбор геометрии полюсного наконечника, определяющий его параметры, позволяет получить коэффициент ударности, близкий к единице, безотносительно к частоте вращения и величине продольной индуктивности генератора.

Использование теории комплексного магнитного сопротивления и результатов моделирования позволило разработать методику расчета геометрии полюсного наконечника, с помощью которой обеспечивается заданный уровень коэффициента ударности.

Следующим фактором, влияющим на рабочие свойства генератора магнитоэлектрического возбуждения, является величина коэффициента рассеяния полюсной системы индуктора. Для оценки этого коэффициента была рассмотрена задача распределения магнитного поля в рабочем пространстве генератора. Аналитическое решение находилось с использованием комбинированного метода: метод Фурье - для уравнения Лапласа при расчете поля в рабочем зазоре и метод Ритца - при расчете поля в междуполюсном пространстве. Полученные аналитические выражения для рабочего магнитного потока и потоков рассеяния позволяют по разработанному алгоритму легко оценить величину коэффициента рассеяния для спроектированной магнитной системы и, в случае необходимости, ввести соответствующие коррективы на этапе проектирования.

Точная оценка величин коэффициентов ударности и рассеяния на этапе проектирования имеет важное значение, так как от этих величин зависит объем магнитного материала, а значит, вес и стоимость генератора.

Результаты экспериментальных исследований макетного образца синхронного генератора подтверждают достоверность разработанной методики синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты, переходные режимы, коэффициент ударности, магнитное поле, экономия активных материалов.