

УДК 621.313.175.32

В.І. Ткачук, В.Г. Гайдук

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ВЕНТИЛЬНИХ ДВИГУНІВ

© Ткачук В.І., Гайдук В.Г., 2001

Наведено структурні схеми регулювання частоти обертання вентильних двигунів постійного струму. Описано способи керування швидкістю вентильних двигунів: неперервного, імпульсного, релейного та дискретно-фазового. Представлено практичні схеми силових перетворювачів вентильного двигуна.

The block diagrams of regulation of frequency of rotation Brushless Direct Current Motor are induced. The ways of management of speed Brushless Motor are described: continuous, pulse, relay and discrete – phase. The practical circuits of power (force) converters Brushless Motor are submitted.

Вентильні двигуни (ВД) постійного струму – це електричні машини постійного струму, в яких щітково-колекторний вузол замінено напівпровідниковим комутатором (НК) – інвертором, який керується сигналами $f(\alpha)$ від датчика положення ротора (ДПР) (рис. 1).

Електромеханічний перетворювач (ЕМП) ВД, на відміну від звичайних колекторних двигунів постійного струму, має нерухому обмотку якоря й обертову систему збудження (полюси).

По суті, вентильний двигун є синхронною машиною, частота струму в обмотках якого є функцією положення ротора.

Різноманітність прийомів та способів керування частотою обертання ВД можна звести до двох структурних схем (рис. 2, а і б).

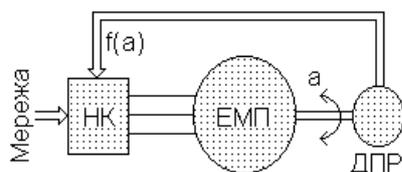


Рис. 1. Принципова схема вентильного двигуна

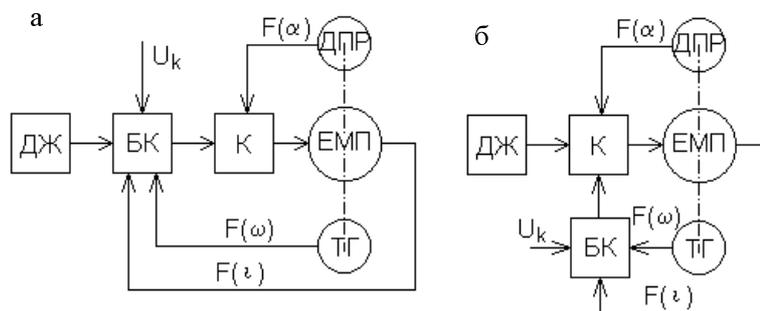


Рис. 2. Структурні схеми керування швидкістю ВД

На схемі (а) весь потік потужності від джерела живлення проходить через блок керування БК, який є підсилювачем лінійного, релейного або імпульсного типу і який керується сигналом U_k . Далі потік потужності, перетворений відповідно з обраним законом керування, що визначається типом підсилювача БК та характером зворотних зв'язків $F(\omega)$ і $F(t)$, надходить на комутатор К і розподілюється по секціях ВД згідно з сигналами ДПР за

законом $F(\alpha)$. Зворотний зв'язок за струмом двигуна $F(t)$ обмежується, як правило, випадками струмообмеження під час пуску.

ВД може мати тахометричний вузол ТГ, який продукує сигнал зворотного зв'язку за швидкістю $F(\omega)$.

Помітною особливістю структурної схеми рис. 2, а є наявність блока керування БК, який має бути розрахованим на повну потужність, що споживається двигуном під час керування.

На схемі рис. 2, б потік потужності від джерела живлення ДЖ надходить безпосередньо на комутатор двигуна К. Блок керування БК, який керується напругою U_k , впливає на комутатор за допомогою сигналів малої потужності. Отже, в цьому випадку функцію керованого підсилювача виконує власне комутатор двигуна К, а блок керування БК тільки формує керувальну функцію. Встановлена потужність БК в схемі (б) є меншою, ніж у схемі (а), що забезпечує переваги за габаритами, вартістю й простотою всієї схеми.

Наявність повністю керованих силових електронних елементів у колі статорних обмоток ВД дозволяє використати їх і для регулювання частоти обертання будь-яким з відомих способів керування. Вибір способу регулювання залежить від конкретних умов роботи приводу і типу електромеханічного перетворювача. Амплітудно-імпульсна модуляція сприятлива для електромеханічного перетворювача, але спричиняє підвищення втрат на силових ключах комутатора. Широтно-імпульсна модуляція зумовлює додаткові втрати від вищих гармонік в електромеханічному перетворювачі і збільшенню динамічних втрат на перемикання силових ключів комутатора. Для формування жорстких механічних характеристик при згаданих способах керування необхідно додатково застосовувати системи авторегулювання.

Способи керування швидкістю вентильних двигунів

Неперервне керування швидкістю двигуна забезпечує можливість плавної зміни напруги, яка підводиться до обмотки статора і може здійснюватись за допомогою регульованого джерела живлення, додаткового блока керування, який регулює рівень напруги за допомогою широтно-імпульсної або частотно-імпульсної модуляції, переводом силових ключів комутатора в активний режим, а також здійсненням широтно-імпульсної модуляції безпосередньо силовими ключами комутатора.

Механічні характеристики ВД за цього способу керування мають вигляд, показаний на рис. 3, а.

Рис. 3, б ілюструє принцип регулювання середнього значення напруги зміною ширини імпульсів за сталого їхнього періоду.

Вентильні двигуни постійного струму найчастіше реалізуються на основі трифазної мостової схеми інвертора за сполучення обмоток у "зірку" (рис. 4). При цьому регулятор струму можна реалізувати як за першою структурною схемою (рис. 2, а), так і за другою схемою (рис. 2, б).

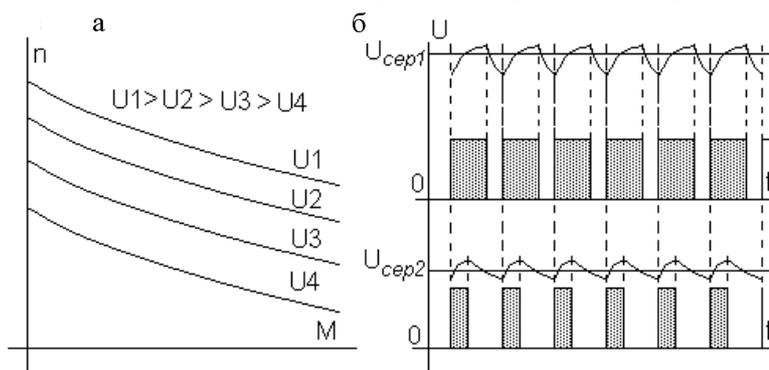


Рис. 3. Механічна характеристика (а) та принцип широтно-імпульсного регулювання напруги (б)

Принципова схема силового перетворювача трисекційного вентиляльного двигуна постійного струму, який складається з трифазного інвертора та послідовного імпульсного регулятора струму зображена на рис. 4. Тут на кожному інтервалі 60 ел. град з джерелом живлення сполучено дві послідовно з'єднані секції ВД. На наступному такому ж періоді перша секція залишається в незмінному стані, друга від'єднується, а раніше знеструмлена сполучається послідовно з першою. Оптронні пари V11 – V32 служать для гальванічного розділення низьковольтних малопотужних інформаційних кіл від високовольтних потужних силових електричних кіл. Вторинні джерела живлення U1 і U2 призначені для додаткового насичення силових ключів інвертора.

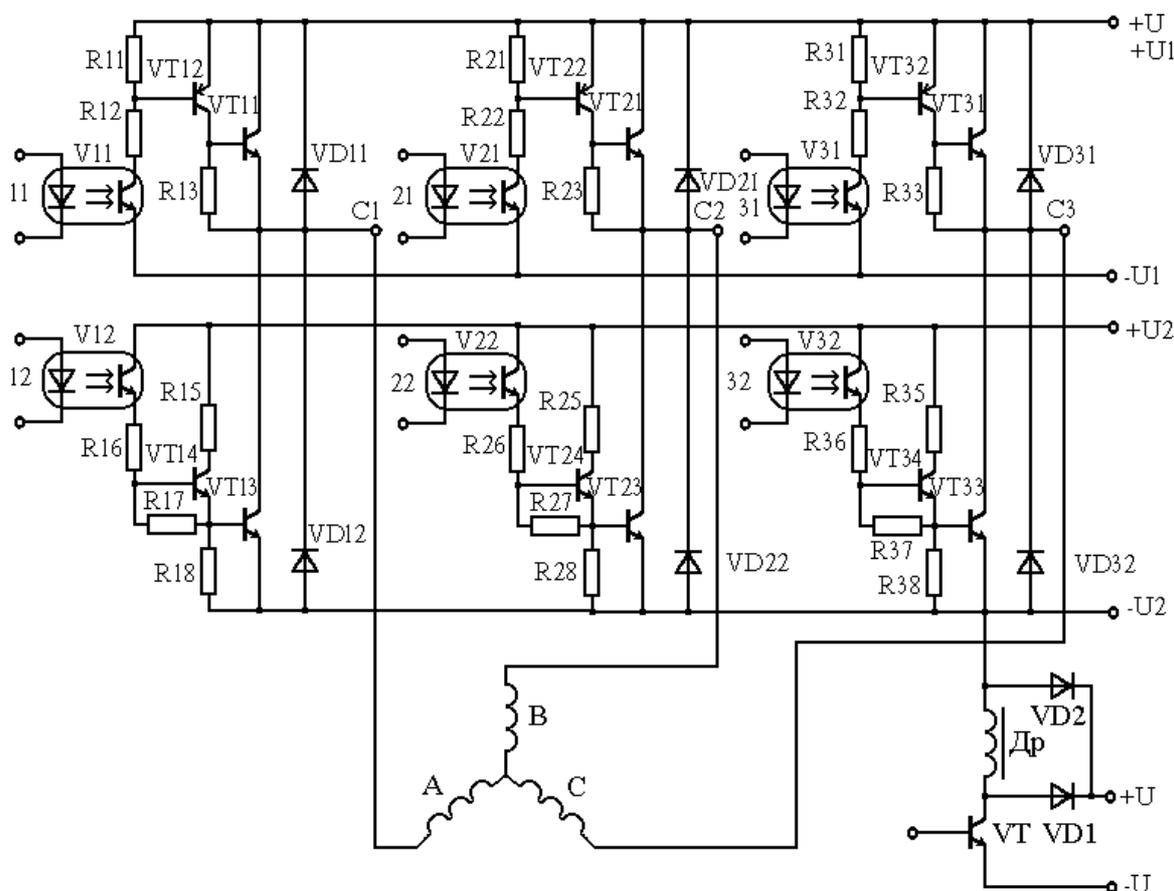


Рис. 4. Силовий перетворювач трисекційного вентиляльного двигуна постійного струму, який складається з трифазного інвертора та послідовного імпульсного регулятора струму

Регулювання струму в цій схемі здійснюється за допомогою послідовно сполученого з інвертором широтно-імпульсного регулятора струму, який складається з силового транзистора VT, дроселя Др та зворотних діодів VD1 і VD2.

Наведену схему доцільно використовувати тоді, коли значення власної індуктивності секцій ЕМП ВД вимагає збільшення частоти широтно-імпульсного модулятора до значень, які перевищують допустимі з погляду частотних втрат у перетворювачі.

Застосування й дослідження силового перетворювача керованого вентиляльного двигуна для приводів роторів медичних рефрижераторної та настільної центрифуг крові [2], а також мотор-колес господарського мінікомплексу "Майстер-А" [3] показали практичну й економічну доцільність такої схеми.

Широтно-імпульсне регулювання можна здійснювати, використовуючи тільки індуктивність обмоток ЕМП. У цьому випадку відпадає необхідність в додаткових силових елементах регулятора і функцію широтно-імпульсного регулятора здійснюють верхні або нижні силові ключі інвертора (рис. 4). Однак таку структурну схему керування можна застосувати тільки у випадку, якщо необхідна частота ШІМ з погляду забезпечення неперервності струму буде прийнятна за частотними втратами в перетворювачі. Ця схема з керування верхніх транзисторних ключів безпосередньо від дискретного давача положення ротора, а нижніх – модульованим з частотою 10 кГц сигналом була використана під час створення електропривода коліс інвалідного візка. Лабораторні та випробувальні дослідження підтвердили теоретичні передбачення ефективності та економічної доцільності застосування таких схем.

Імпульсне керування швидкістю ВД можна здійснювати однополярними або двополярними імпульсами.

Однополярне імпульсне регулювання через затруднення, яке виникає під час глибокого регулювання з малими значеннями моменту навантаження характеризується невеликим діапазоном стійкого регулювання (1:15–1:20).

Двополярне регулювання імпульсами різної полярності, одна з яких відповідає додатному моменту двигуна, а друга – від'ємному моменту в режимі противмикання, забезпечує стійку лінійну регульовальну характеристику. Проте цей режим характеризується несприятливими енергетичними показниками, особливо в зоні малих швидкостей, де двигун споживає потужність, наближену до пускової.

Релейний спосіб керування швидкістю ВД. Структура схема релейного регулювання з лінійним зворотним зв'язком за швидкістю двигуна показана на рис. 5. Напряга керування U_k порівнюється з сигналом зворотного зв'язку $k\omega$ і сигнал різниці $\sigma = U_k - k\omega$ діє на релейний елемент, який вмикає або вимикає двигун залежно від знака σ .

Використання цього способу не завжди вимагає інформації про швидкість двигуна в аналоговому вигляді і треба мати інформацію тільки про досягнення двигуном заданого рівня частоти обертання. У цьому випадку можна застосувати реле частоти обертання [4].

Система релейної стабілізації частоти обертання ВД, незважаючи на обмеження можливості за точністю (0,5–1 % без застосування спеціальних заходів і до 0,15 % з підбором елементів й налагоджуванні), має доволі широке розповсюдження завдяки своїй простоті. Що стосується регулювання частоти обертання двигуна за допомогою цього способу, то він дозволяє забезпечити діапазон регулювання 1:50–1:100, а в окремих випадках і 1:200–1:400.

Дискретно-фазове регулювання швидкості ВД. Підвищення вимог до точності підтримання швидкості двигунів, які використовують в приводах високоякісних магнітофонів, апаратів відеозапису та інших пристроїв призвело до появи способів стабілізації швидкості, які базуються на порівнянні еталонної частоти задавального генератора й частоти зворотного зв'язку, яка пропорційна власній частоті обертання вала двигуна. Якщо порівняння здійснюється за допомогою елементів дискретної дії без перетворення в аналогові сигнали, що виключає зв'язані з перетворенням похибки, то в такій системі точність підтримання

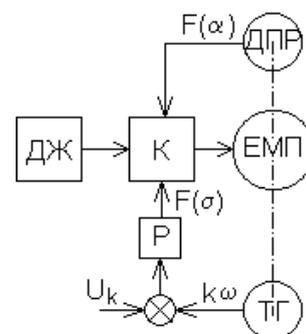


Рис. 5. Структурна схема релейного керування

середнього значення частоти обертання двигуна буде визначатись тільки стабільністю еталонної частоти, яка може бути доволі високою (кварцеві генератори).

Принципова схема дискретно-фазового способу регулювання або стабілізації швидкості ВД постійного струму показана на рис. 6, а. Задавальний генератор ЗГ продукує імпульси

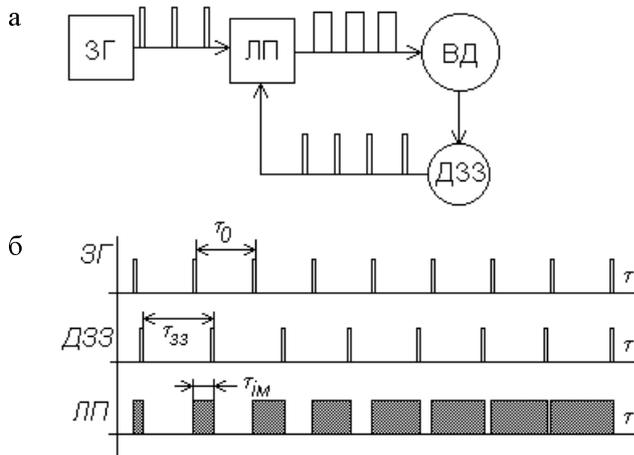


Рис. 6. Структурна схема (а) та діаграма імпульсів (б) дискретно-фазового способу стабілізації швидкості ВД

малої тривалості, які мають період $\tau_0 = t_0 / T$. Послідовність імпульсів ЗГ надходить на логічний пристрій ЛП. ВД має давач зворотного зв'язку ДЗЗ, який видає частоту імпульсів зворотного зв'язку, яка пропорційна швидкості двигуна

$$f_{33} = \frac{z \cdot n}{60} = \frac{z \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{t_{33}} = \frac{T}{\tau_{33}}, \quad (1)$$

де n – кількість обертів за хвилину, z – кількість імпульсів давача зворотного зв'язку за один оберт.

Імпульси зворотного зв'язку також надходять на логічний пристрій ЛП, де відбувається порівняння їхньої фази з фазою імпульсів задавального генератора. У простішому випадку схема ЛП побудована

так, що кожний імпульс ЗГ вмикає двигун, а кожний імпульс ДЗЗ вимикає його. Коли настає усталений режим стабілізації швидкості, то забезпечується рівність $\tau_{32} = \tau_0 = \tau_{33}$ і на виході логічного пристрою утворюється послідовність імпульсів постійної тривалості, які діють на комутатор ВД (на схемі не показаний) так, що протягом імпульсу двигун увімкнений, а протягом паузи – відімкнений (або, залежно від прийнятого закону керування, знаходиться в режимі електричного гальмування). Якщо період імпульсів ДЗЗ має відхилення від періоду ЗГ, тобто швидкість двигуна не дорівнює необхідній стабілізованій швидкості, то послідовність імпульсів вмикання $\tau_{им}$, зображена на рис. 6, б, буде мати змінну тривалість, що відповідатиме перехідному процесові стабілізації.

Широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання ВД. Відомі дискретно-фазові способи регулювання, які дозволяють здебільшого без додаткових кіл корекції перейти до астатичних структур автоматичних систем стабілізації. Проте такі системи мають суттєвий недолік, який полягає в низькій перевантажувальній здатності і необхідності вирішення питання введення в синхронізм.

У [1] запропонований широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання ВД, який дозволяє отримувати достатньо жорсткі механічні характеристики без організації додаткової системи авторегулювання. Суть способу полягає в тому, що примусовий інтервал комутації секції ВД формується логічним множенням сигналів ДПР і сигналів формувача регульованої часової затримки. Цим досягається зміна середнього значення напруги, яка підводиться до секції ВД.

Розглянемо принцип широтно-фазового регулювання (ШФР) ВД на прикладі трисекційного ВД з однопівперіодним ЕК, схема якого та діаграма імпульсів, зображені на рис. 7.

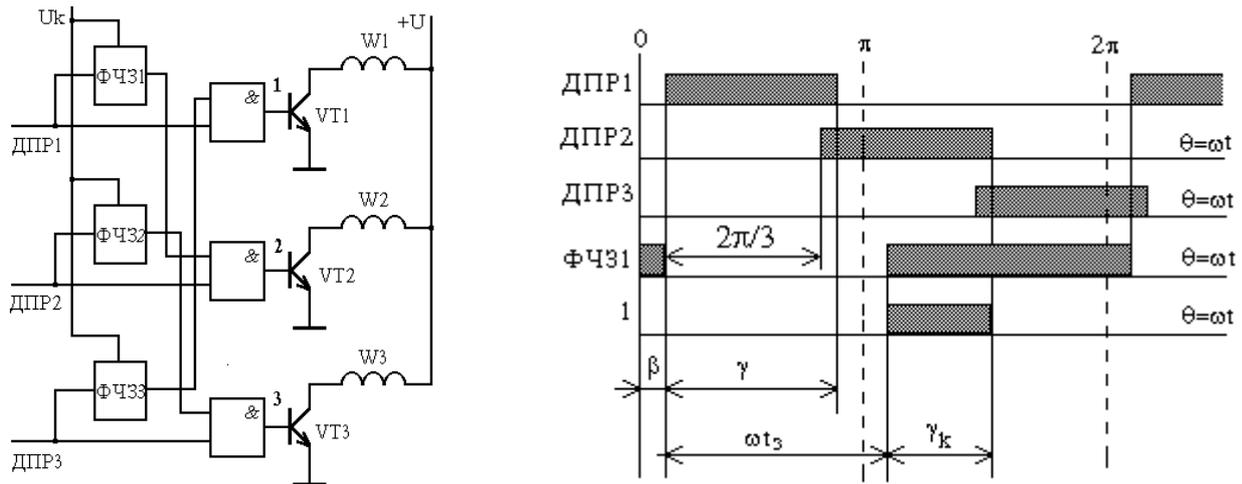


Рис. 7. Спрощена схема ВД з широтно-фазовим регулюванням та діаграма імпульсів

Секції ВД $W1 - W3$ через силові ключі ЕК $VT1 - VT3$ під'єднуються до постійної напруги джерела живлення U . Вихідні сигнали ДПР1 – ДПР3 давача положення ротора через схему керування, яка містить формувачі регульованої часової затримки $\PhiЧЗ1 - \PhiЧЗ3$ та логічні схеми збігу $\&$, керують силовими ключами ЕК. Значення часової затримки t_3 визначається рівнем сигналу U_k . Імпульси ДПР характеризуються такими величинами: кутовим розміром сигнального сектора γ в електричних радіанах і початковою фазою примусового інтервалу комутації секції β . Вихідні імпульси 1–3 схеми керування визначають примусовий інтервал комутації секції ВД γ_k в електричних радіанах.

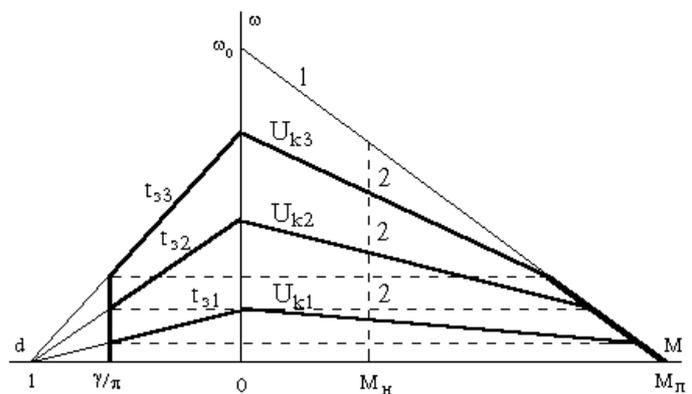


Рис. 8. Механічні характеристики ВД та залежність відносного значення інтервалу комутації секції від частоти обертання ротора

На рис. 8 зображено ідеалізовану природну механічну характеристику (1) ВД зі збудженням від ПМ та механічні характеристики при ШФР (2), а також залежності відносного значення інтервалу комутації d від частоти обертання ω для різних значень t_3 .

Застосування ШФР ВД дозволяє досить простим способом отримувати регульовальні характеристики за рахунок зміни величини і фази відносного значення примусового інтервалу комутації секції. При цьому існує функціональний зв'язок, який еквівалентний за дією від'ємному зворотному зв'язку за швидкістю, що підвищує жорсткість механічних характеристик.

1. Ткачук В. Широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання електроприводів на базі вентильних двигунів // Проблемы автоматизированного электропривода // Теория и практика: Вестн. ХГПУ, спец. вып. – Харків, 1998. – С. 185–186. 2. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Автоматизований електропривод центрифуги крові на базі вентиляного дви-

гуна // Пр. 3-ї Української конф. з автоматичного керування "Автоматика – 96". – Севастополь, 1996. – С. 113–114. 3. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Вентильний електропривод мотор-коліс // Пр. 4-ї Української конф. з автоматичного керування "Автоматика – 97". – Черкаси, 1997. – С. 52. 4. Зубач В.Ф., Ткачук В.І. Безконтактне електронне реле швидкості // Вісн. Львів. політ. ін-та. – 1979. – № 9. – С. 111–116.

УДК 621.3

Р. Фільц

Технічно-Рільнича Академія в Бидгощі, Польща

УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАТИЧНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗІ СТРИЖНЕВИМ НЕПРОВІДНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ МАГНІТОПРОВОДОМ

© Фільц Р., 2001

Описана математична модель для розрахунку перехідних процесів в узагальненому багатополюснику, що є статичним електромагнітним пристроєм, у якому магнітопровід має довільну стрижневу конструкцію, а котушки, що охоплюють окремі стрижні або їх групи, утворюють довільне електричне коло. Модель призначена для безпосереднього її застосування в моделях систем, орієнтованих на використання методу вузлових потенціалів і неявних методів інтегрування.

Abstract. Mathematical model for transients calculation in multipol, which is the generalized static electromagnetic converter with an arbitrary electric circuit and with rod-type ferromagnetic core of arbitrary construction is proposed. The model may be used as a part of system model, which is based on nodal method and implicit integration algorithm.

У сучасних електричних системах широко застосовують статичні електромагнітні перетворювачі зі стрижневими магнітопроводами (СЕПСМ) – однофазні й багатofазні, двообмоткові й багатообмоткові трансформатори, дроселі, статичні електромагнітні помножувачі частоти тощо. Розрахунок перехідних процесів у таких системах передбачає створення математичних моделей усіх елементів системи, зокрема, наявних у системі СЕПСМ. Опрацювання математичних моделей окремо для кожного типу СЕПСМ пов'язане з затратами висококваліфікованої праці, тому в сучасних умовах значно більш ефективною є стратегія, спрямована на створення моделі узагальненого СЕПСМ як статичного електромагнітного пристрою, в якому магнітопровід має довільну стрижневу конструкцію, а котушки, що охоплюють окремі стрижні або їх групи, утворюють довільне електричне коло. Тоді опрацювання математичної моделі СЕПСМ конкретного типу зведеться до конкретизації вхідних даних про цей перетворювач у вигляді матриці, що описує схему його магнітного кола, вебер-амперних характеристик гілок цього кола, матриць, що описують