УДК 621.316.722:621.382.233.026:621.313.333

ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР ЗМІННОЇ НАПРУГИ ЯК ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ В СИСТЕМАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ

М. Ю. Базишин, Д. Й. Родькін
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: bazyshyn.m.y@gmail.com

Однією з умов використання енергетичного методу є формування полігармоничної наруги на обмотці асинхронного двигуна. Як джерело розглядався тиристорний регулятор напруги. Однак існує низка нерозглянутих джерел полігармоничної наруги, побудованих на не повністю керованих ключах, а саме: пряме включення тільки одного тиристора на фазу; тиристора із зустрічно-паралельним діодом; несиметричне керування ключами тиристорного регулятора напруги. Внаслідок особливостей закриття тиристорів, при однакових кутах відкриття на двигунах із різними параметрами гармонічний склад напруги відрізняється, залежно від кута їх запирання. Для встановлення залежності гармонічного складу напруги й струму було проведено імітаційне моделювання кожної з розглянутих схем. Джерело полігармонічної напруги, що складається з одного тиристора, має найбільші значення амплітуд першої та другої гармоніки напруги. У струмі статорної обмотки це постійна й перша складова. Джерело побудов на тиристорі із зустрічно-паралельним діодом формує напругу, у складі якої перша гармоніка має найбільшу амплітуду, а в сигналі струму – це нульова та перша. Діапазон регулювання починається від кута, при якому закривається діод, і до максимально можливого кута відкриття тиристора. З розглянутих варіантів перші два джерела можна віднести до окремих випадків несиметричного керування ключами тиристорного регулятора. Доцільно використовувати несиметричне керування, оскільки це дає можливість із більшою точністю регулювати гармонічний склад напруги, що пов'язано з великою кількістю варіацій кутів відкриття тиристорів.

Ключові слова: тиристорний регулятор напруги, несиметричне керування, полігармонічне живлення.

ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ КАК ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ В СИСТЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

М. Ю. Базышин, Д. И. Родькин
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: bazyshyn.m.y@gmail.com

Одним из условий использования энергетического метода является формирование полигармонического напряжения на обмотке асинхронного двигателя. Как источник рассматривался тиристорный регулятор напряжения. Однако существует ряд нерассмотренных источников полигармонического напряжения, построенных на не полностью управляемых ключах, а именно: прямое включение только одного тиристора на фазу; тиристора со встречно-параллельным включенным диодом; несимметричное управление ключами тиристорного регулятора напряжения. Вследствие особенностей запирания тиристоров, при одинаковых углах открытия на двигателях с различными параметрами гармонический состав напряжения отличается в зависимости от угла их запирания. Для установления зависимости гармонического состава напряжения и тока от угла открытия тиристоров было проведено имитационное моделирование каждой из рассматриваемых схем. Источник полигармонического напряжения, состоящий из одного тиристора, имеет наибольшие значения амплитуд первой и второй гармоники напряжения. В токе статорной обмотки это постоянная и первая составляющая. Источник построений на тиристоре со встречно-параллельным диодом формирует напряжение, в составе которого первая гармоника имеет наибольшую амплитуду, а в сигнале тока – это нулевая и первая гармоники. Диапазон регулирования начинается от угла, при котором запирается диод, и до максимально возможного угла открытия тиристора. Из рассмотренных вариантов первые два источника можно отнести к частным случаям несимметричного управления ключами тиристорного регулятора. Целесообразно использовать несимметричное управление, поскольку оно позволят с большей точностью регулировать гармонический состав напряжения, что связано с большим количеством вариаций углов открытия тиристоров.

Ключевые слова: тиристорный регулятор напряжения, несимметричное управление, полигармоническое питание.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Асинхронний двигун (АД) є одним із найбільш розповсюджених перетворювачів електричної енергії в механічну. При побудові систем керування, математичних чи імітаційних моделей як параметри двигунів використовуються паспортні (каталожні) дані. При виході двигуна з ладу він за регламентом поступає на експертну оцінку й при доцільності його ремонту надсилається в ремонт. Особливості технології ремонту двигунів призводять до погіршення їх електромагнітних параметрів.

Післяремонтні випробування залежно від підприємства, де експлуатується чи ремонтується двигун зазвичай зводяться до випробування стійкості ізоля-

ції обмоток АД, що не дає можливості визначити як параметри двигуна, так і його експлуатаційні характеристики.

Визначення параметрів двигуна дозволяє продовжити термін служби двигуна за рахунок коректного налаштування систем захисту й керування електроприводом. Різноманітні методи ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів дозволяють визначити їх поточні або післяремонтні параметри. Проте більшість цих методів є трудомісткими й нетехнологічними, деякі з них потребують спеціального дорогого обладнання [1].

Останнім часом активно розвивається енергетичний метод [1, 2] ідентифікації параметрів АД, оснований на теорії миттєвої потужності, принципах гармонічного аналізу струмового відклику АД на живлення полігармонічною напругою. Основною вимогою використання енергетичного методу є живлення обмоток двигуна полігармонічною напругою, що формується спеціальним чином із використанням відповідного джерела [1, 2]. Вважається, що джерело полігармонічної напруги (ДПН) – це спеціалізований пристрій, що формує напругу з необхідним набором гармонік [3–5].

Джерело полігармонічної напруги [2] повинно відповідати наступним вимогам: по-перше, це мінімальна потужність джерела, яка повинна відповідати близько 15–20 % потужності двигуна [3], параметри якого визначаються; по-друге, забезпечувати необхідний спектр напруги на обмотці двигуна, а саме: кількість гармонік, їх амплітуду та фазу.

У переважній більшості випадків перетворювачі й регулятори будуються на основі напівпровідникових ключів: тиристорів, симісторів, транзисторів у ключовому режимі роботи. Ці ключі в силу своїх функціональних особливостей і фізичних принципів роботи можуть виступати в деяких схемах їх включення як джерела полігармонічної напруги. Звідси виходить, що полігармонічне джерело живлення може бути побудовано на основі перетворювачів частоти чи тиристорних перетворювачів напруги.

У перетворюючих пристроях, що входять до складу регульованого приводу, для підвищення якості живлення мінімізують кількість гармонік. Із цих причин немає можливості отримати традиційними методами полігармонічний сигнал напруги, який задовольняє перераховані вище вимоги.

У більшості робіт, пов'язаних з енергетичним методом [1], як джерело полігармонічної напруги використовується тиристорний регулятор напруги (ТРН) із двома зустрічно-паралельно включеними однооперaційними тиристорами або симістором(ами) на кожній із фаз [6–10]. Використання ТРН є найбільш простим і дешевим способом формування полігармонічної напруги на обмотках АД. Дослідження щодо залежності гармонічного складу напруги від кута відкриття ключів ТРН розглянуто в [1, 4]. Полігармонічний сигнал, сформований за допомогою ТРН, містить тільки непарні гармоніки напруги та струму, які при деяких кутах керування (близько 75–120 °) є рівномірно спадаючим. Сигнал потужності, отриманий добутком сигналів струму та напруги, містить нульову та парні гармоніки. Для даного джерела характерно, що амплітуди гармонік цього джерела зменшуються із частотою. Незважаючи на переваги ТРН, він не дозволяє забезпечити повною мірою пред'явлені вище вимоги для ДПН, а саме: забезпечити необхідну кінцеву кількість гармонік і приблизно однакові їх амплітуди.

Альтернативні методи формування полігармонічної напруги, що відрізняються від класичного ТРН, не розглядалися, за винятком однофазного інвертора [12], який не набув широкого використання. Окрім класичного ТРН можуть використовуватися й альтернативні варіанти формування полігармонічної напруги, які побудовані на не повністю керованих ключах. Це, по-перше, використання тільки одного тиристора на фазу, по-друге, тиристора із зустрічно-паралельно включеним діодом, по-третє, використання несиметричного керування ключами тиристорного регулятора напруги.

Оскільки гармонічний склад полігармонічного сигналу є важливим чинником в ідентифікації параметрів АД енергетичним методом, є необхідність у дослідженні альтернативних схем формування полігармонічного сигналу на не повністю керованих ключах. Порівняння їх впливу на спектр сигналів струму, напруги, потужності, при використанні різних кутів відкриття тиристорів, є нерозглянутим й актуальним питанням з позиції ідентифікації параметрів асинхронних двигунів енергетичним методом.

Метою роботи є дослідження джерел полігармонічної напруги на основі не повністю керованих ключів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Схема тиристорного регулятора із двома зустрічно-паралельними тиристорами не єдине схемотехнічне рішення ТРН, що зустрічається в літературі [10]. При аналізі цих схем був зроблений висновок, що, незважаючи на різні схемотехнічні рішення, вони мають гармонічний склад полігармонічного сигналу напруги, ідентичний традиційній схемі, й відрізняються лише падінням напруги на ключах і максимально допустимою зворотною напругою на них. Єдина схема ТРН, гармонічний склад якої відрізняється від класичного, складається з тиристора із зустрічно-паралельно включеним діодом [9] і має специфічне використання в регульованому електроприводі та системах плавного пуску.

Керування відкриттям тиристорів ТРН (рис. 1) відбувається системою імпульсно-фазового керування [10, 11]. Відлік кута відкриття тиристора починається від нуля фазної напруги. Надалі в роботі кутом відкриття тиристора VS_1, буде α_1 (позитивна півхвиля відносно нуля), а VS_2 – α_2 (від'ємна півхвиля відносно нуля) (рис. 1).

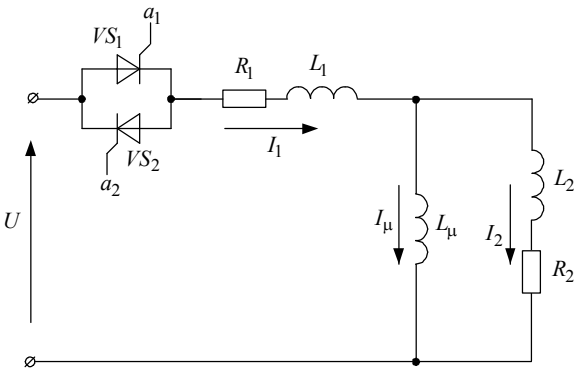


Рисунок 1 – Заступна схема АД з ТРН як джерелом полігармонічної напруги

Використання однооперaційних тиристорів і симісторів, які є не повністю керованими ключами, пов'язано з деякими особливостями їх роботи, зокрема їх запиранням, яке за природної комутації відбувається в момент спаду струму до нуля (зміні напрямку його протікання). Для активного навантаження спад напруги та струму до нуля співпадають і, навпаки, при використанні активно-індуктивного навантаження – не співпадають. Одним із чинників, що впливає на спектр сигналу струму та напруги, – це кут запирання тиристора чи діода β, який залежить безпосередньо від параметрів двигуна. Інтервал провідності λ [9] дорівнює різниці кута запирання β та кута відкриття α; λ=β–α.

У процесі ідентифікації параметрів енергетичним методом використовується дослід короткого замикання, при цьому формується полігармонічна напруга на обмотках АД. Оскільки двигун із зафіксованим ротором має низький опір, амплітуди напруги живлення зменшують до необхідного рівня, орієнтуючись на струм, що протікає через обмотки двигуна, який не повинен перевищувати номінальний струм двигуна, збільшеного в п'ять–сім разів. Для цього можуть використовуватися понижуючі трансформатори або задаються кути відкриття тиристорів ТРН більше 140 ° [1].

Для дослідження схем формування полігармонічної напруги, визначення впливу кутів відкриття тиристорів на спектральний склад струму, напруги й потужності на обмотці статора було проведено низку модельних експериментів. Імітаційну модель (рис. 2) побудовано в пакеті прикладних програм MATLAB у його додатку Simulink [12] з використанням елементів бібліотеки SimPowerSystems [13]. Модель складається з джерела полігармонічної напруги (ДПН), побудованого на не повністю керованих ключах, системи імпульсно-фазового керування (СІФК) Т-подібної заступної схеми АД з лінійними елементами, датчиками струму (ДС) у кожному колі й напруги (ДН). Дана модель дає можливість фіксувати миттєві значення струму в кожному її колі, детально розглянути енергетичні процеси та провести спектральний аналіз кожного кола. Керування відкриттям ключів відбувалося за допомогою СІФК, яка, залежно від розглядаємого джерела, керує одним чи двома тиристорами. Залежно від експерименту, використовувалися паспортні дані двигунів 4АП100 й 4А132М4, параметри яких приведені в табл 1.

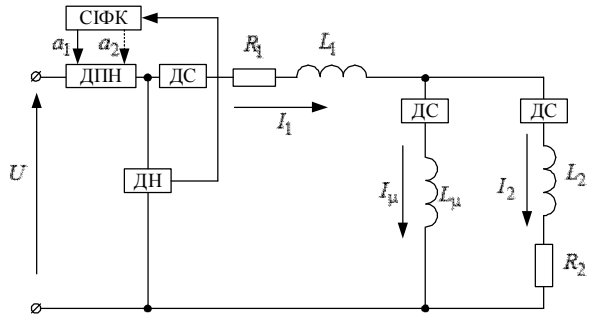


Рисунок 2 – Імітаційна модель

Таблиця 1 – Паспортні дані двигунів 4АП100 та 4А132М4

Параметр	Значення	
Двигун	4АП100	4А132М4
$P_н$, кВт	4	11
$U_н$, В	380	380
$I_{1н}$, А	8,7	22
$n_н$, об/хв	1420	1398
cosφ	0,84	0,876
η	0,84	0,88
R_1, Ом	1,35	0,47
R_2, Ом	1,38	0,3
L_1, Гн	0,00676	0,0026
L_μ, Гн	0,246	0,088
L_2, Гн	0,00673	0,004

Визначення миттєвої потужності на джерелі відбувалося добутком миттєвих значень сигналів струму статора й напруги. Отриманий сигнал потужності розкладався в гармонічний ряд виду

$$p(t)=u(t)i(t)=\sum_{n=0}^{N}U_n\,sin(n\Omega t-\varphi_n)\times$$

$$\times\sum_{m=0}^{M}I_m\,sin(m\Omega t-\varphi_m)=\sum_{k=0}^{K}P_k sin(k\Omega t-\varphi_k),$$

де U_n – амплітудне значення складових напруги гармонік; n – порядок гармонік напруги; N – число гармонік напруги; Ω – частота мережі; φ_n – кут зсуву фази напруги; I_m – амплітудне значення складових струму вищих гармонік; m – порядок гармонік струму; M – число гармонік струму; φ_m – кут зсуву фази гармоніки струму; P_k – амплітудне значення k-тої гармоніки потужності; k – номер гармоніки потужності; K – число гармонік напруги в гармонічному ряді; φ_k – кут зсуву фази відповідної гармоніки потужності.

Для встановлення залежності гармонічного складу від кута відкриття не повністю керованих ключів необхідно для кожного їх значення в заданому діапазоні виконати гармонічний аналіз одного з періо-

дів після проходження перехідних процесів у колах заступної схеми. Для автоматизації процесу моделювання були використані вбудовані можливості MATLAB щодо програмування [14–16] і створений М-сценарій.

Для кожного з варіантів ДПН задавався діапазон кутів відкриття тиристорів, у якому α_{min} – початкове значення діапазону, α_{max} – кінцеве значення діапазону. У М-сценарії крім α_{min} та α_{max} прописуються $\alpha_{пот}$ – поточне значення кута відкриття тиристора, яке є змінною величиною в процесі його роботи, $\alpha_{крок}$ – крок (величина), з яким буде збільшуватися поточне значення кута $\alpha_{пот}$ на кожній ітерації. Задається період, на якому буде проведено гармонічний аналіз.

Для побудови залежностей амплітуди постійної й знакозмінних складових від кута відкриття тиристорів їх значення для кожного кута заносяться до масиву, на основі якого вони будуються. Алгоритм (рис. 3) проведення модельного експерименту є ітераційним. Спочатку оголошуються параметри елементів заступної схеми й відкривається модель. Наступним кроком є запуск моделі на виконаня з $\alpha_{пот}$, що дорівнює α_{min}, далі визначаються амплітуди напруги й струму та запис їх до відповідних масивів. На наступній ітерації $\alpha_{пот}$ присвоюється сума попереднього значення $\alpha_{пот}$ та $\alpha_{крок}$. Даний алгоритм виконується доти, доки не виконається умова $\alpha_{пот} \geq \alpha_{крок}$. У кінці остаточно формуються масиви з даними й будуються криві на їх основі.

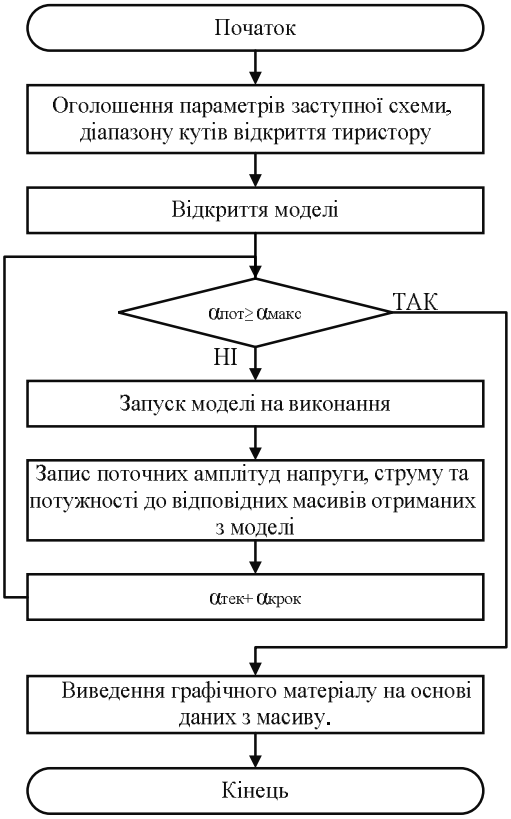


Рисунок 3 – Алгоритм проведення модельного експерименту

Окрім класичного ТРН можуть використовуватися й альтернативні варіанти формування полігармонічної напруги, побудовані на не повністю керованих ключах. Перше – це використання тільки одного тиристора на фазу, друге – тиристора із зустрічно-паралельно включеним діодом, третє – використання двох зустрічно включених тиристорів із несиметричним керуванням ключами ТРН.

Перший альтернативний варіант формування полігармнічної напруги складається з одного прямоввімкнутого тиристора (рис. 4). Ця схема є напівперіодним регульованим випрямлячем. Можливий діапазон керування спектром даної схеми знаходиться від 0 до 180 °. Полігармонічні сигнали напруги й струму містять у своєму складі як постійну складову, так і парні й непарні гармоніки. Криві струму та напруги апроксимуються звичайним рядом Фур'є.

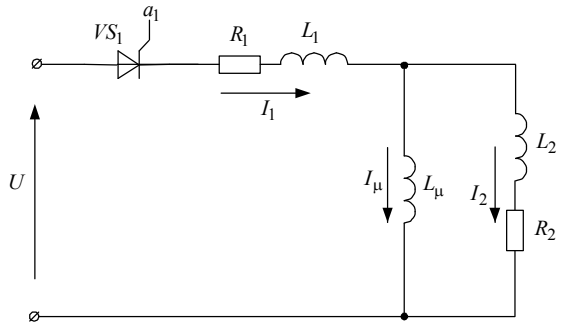


Рисунок 4 – Заступна схема АД з джерелом полігармонічної напруги на одному не повністю керованому ключі

При заданні одного й того самого кута відкриття тиристора на різних двигунах, які значно відрізняються своїми параметрами, інтервал провідності λ буде варіюватися. При однакових кутах відкриття тиристорів α кут їх запирання β є змінною величиною, яка залежить від параметрів двигуна. Інтервал провідності тиритора λ при більшому куті β буде тривалішим, що змінить форму кривих струму й напруги, відповідно коефіцієнти апроксимуючого ряду будуть відрізнятися для двох різних двигунів. Для визначення різниці гармонічного складу між двома двигунами був проведений модельний експеримент для схеми (рис. 2) з використанням двох двигунів 4АП100 та 4А132М4. Криві, отримані в результаті модельного експерименту, приведені на рис. 5 при куті відкриття тиристора α=60 °.

Як видно з графіка (рис. 6), при однакових кутах відкриття тиристора α на більш потужному двигуні (4А132М4) кут закриття тиристора ($\beta_2 \approx 255$ °) має більше значення, ніж у менш потужного (4АП100) ($\beta_1 \approx 235$ °). Інтервал провідності для 4А132М4 буде рівним близько ($\lambda_2 \approx 190$ °), для 4АП100 ($\lambda_1 \approx 170$ °). Дане явище пов'язано із значно більшим струмом, що протікає в момент накопичення енергії в магнітному полі АД.

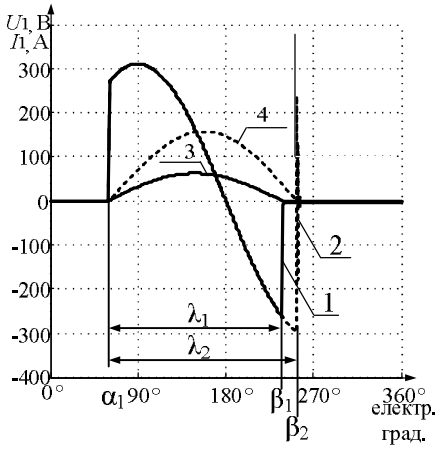


Рисунок 5 – Криві напруги двигунів:
1, 2 – 4АП100, 4А132М4; 3, 4 – струму

Було порівняно амплітуди перших п’яти гармонік, що входять до складу сигналу напруги при куті відкриття тиристора α=60 ° для даного джерела полігармонічної напруги (рис. 4). Різниця в спектрах напруги між двигунами визначалася модулем різниці відповідних гармонік. На рис. 4 видно, що різниця в амплітудах першої, другої та п’ятої гармонік є доволі значною, де *n* – номер гармоніки напруги.

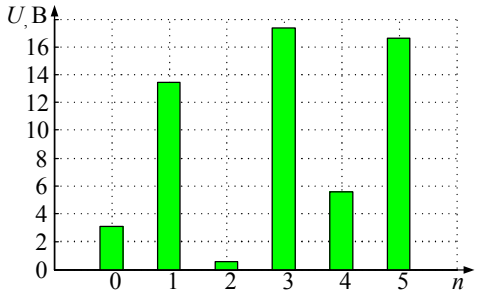


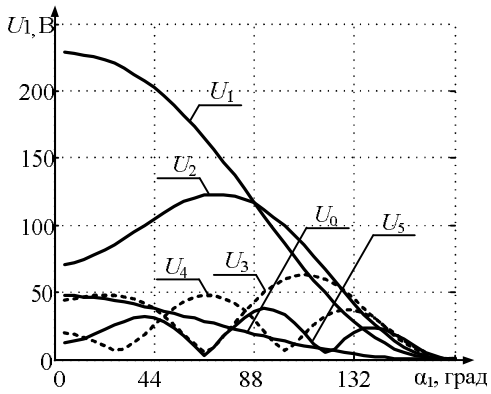
Рисунок 6 – Модуль різниці спектрів напруги між 4АП100 та 4А132М4 при α=60 °

Очевидно, що закриття не повністю керованих ключів залежить від самоіндукції двигуна. Керування амплітудами гармонік напруги є малоефективним, тому доцільно з декількох варіантів кутів відкриття тиристора обрати найбільш відповідний.

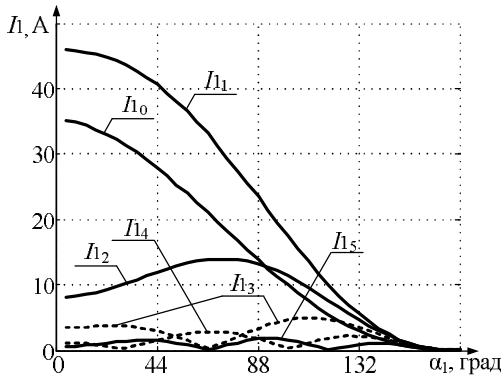
Для визначення залежності амплітуд перших п’яти гармонік від кута відкриття тиристора в схемі з прямо ввімкненим тиристором (рис. 4) було проведено імітаційне моделювання з різними кутами відкриття тиристора α_1 у діапазоні від 0 до 180 °. Як дослідницький об’єкт було використано двигун 4АП100. На рис. 7,а зображено залежність амплітуд гармонік на обмотці статора при різних кутах відкриття тиристора, з якого видно, що гармоніки, які мають найбільші амплітуди, – це перша та друга. Друга гармоніка до певного кута (≈65 °) буде збільшуватись, а після його зростання зменшуватиметься. При куті близько 60–65 ° третя та п’ята гармоніки напруги мають найменші значення відносно інших. Із цього можна зробити висновок, що при даних кутах ними можна знехтувати в системі балансу потужностей через відносно малу амплітуду, згідно з принципом суперпозиції. Амплітуди гармонік струму статорного кола (рис. 7,б) є пропорційними амплітудам гармонік напруги. Через відсутність активного опору в контурі намагнічування величини постійної складової (рис. 8,а) в ньому й спектрі струму статорного кола будуть рівними. Інші гармоніки мають невеликі амплітуди через великий реактивний опір L_μ (рис. 8,а). У роторному колі постійна складова відсутня, інші гармоніки мають меншу амплітуду, ніж гармоніки статорного кола.

На рис. 9 зображено залежності амплітуд потужності на джерелі полігармонічної напруги від кута відкриття тиристора.

На рисунках прийняті позначення: U_n – амплітуди гармонік напруги; $I1_m$, $I\mu_m$, $I2_m$ – амплітуди гармонік струму відповідних кіл; P_k – амплітуди гармонік потужності; *n* – номер гармоніки напруги.

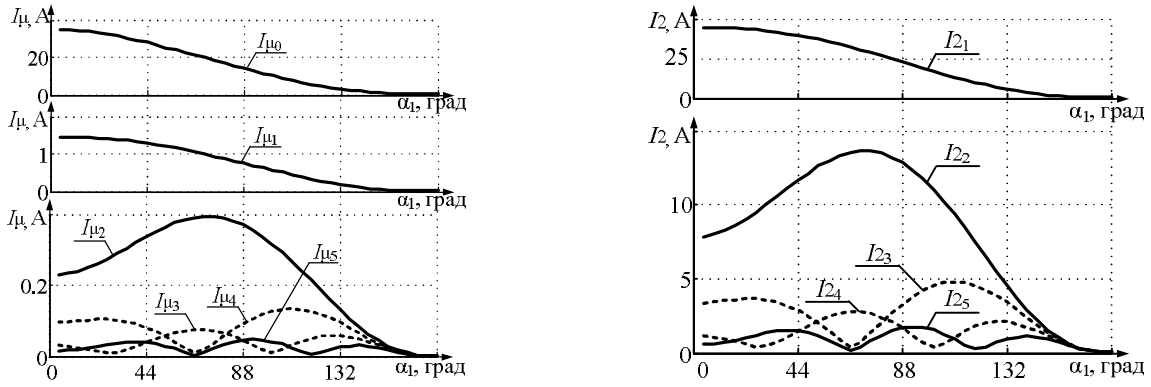


а)



б)

Рисунок 7 – Залежності амплітуд постійної складової та перших п’яти гармонік напруги (а) та струму статора (б) для схеми з одним тиристором від кута його відкриття



а) б)

Рисунок 8 – Залежності амплітуд постійної складової та перших п’яти гармонік струму контуру намагнічування (а), струму роторного кола (б) для схеми з одним тиристором від кута його відкриття

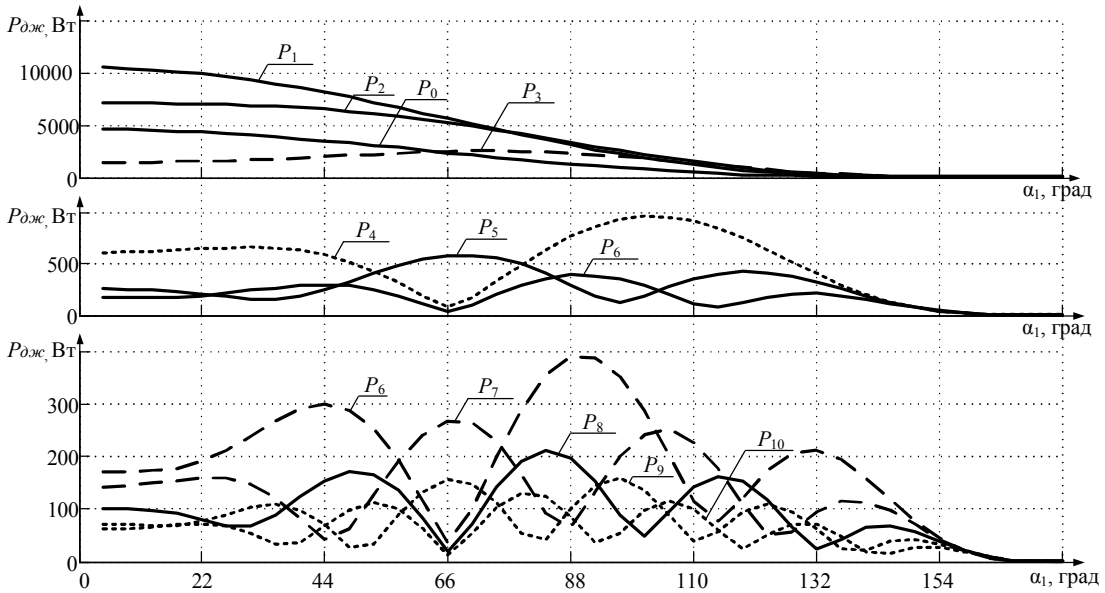


Рисунок 9 – Залежності амплітуд гармонік потужності джерела живлення від кута відкриття тиристора для схеми з одним тиристором

Для даного випадку оптимальними кутами відкриття тиристора є 120–155 °, оскільки при цих кутах амплітуди гармонік мають невелику різницю між собою.

Іншим способом формування полігармнічної напруги є схема, в якій один тиристор включений паралельно із зустрічним діодом (рис. 10). До особливостей цієї схеми належить те, що регулювання спектром можливе за рахунок задання різних кутів відкриття тиристора VS_1 на першому півперіоді. Другий півперіод (від’ємна півхвиля) є нерегульованим, оскільки струм до навантаження буде пропускатися діодом (аналогічно однополуперіодному випрямлячу).

Криві струму й напруги, отримані з використанням даного джерела полігармонічної напруги (рис. 10), при куті відкриття тиристора α_1=120 ° приведені на рис. 11, на якому зображено два періоди T_1 і T_2; β_1 і β_2 – кути запирання для двигунів, інтервали провідності λ_1, λ_2 для двигунів 4АП100, 4А132М4 відповідно.

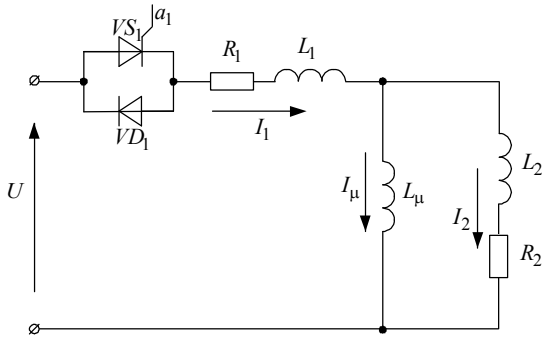


Рисунок 10 – Заступна схема АД з джерелом полігармонічної напруги на основі не повністю керованих ключів

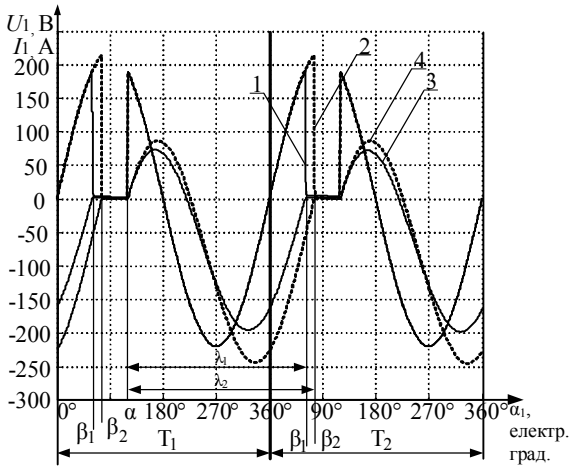


Рисунок 11 – Криві напруги двигунів:
1, 2 – 4АП100, 4А132М4; 3, 4 – струму

Очевидно, що при збільшенні кута запирання постійна складова на період буде зменшуватись, а амплітуда першої гармоніки буде збільшуватись. Модуль різниці спектрів напруги при використанні двох різних двигунів приведено на рис. 12, де *n* – номер гармоніки напруги.

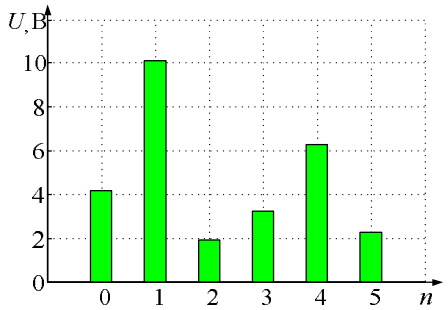
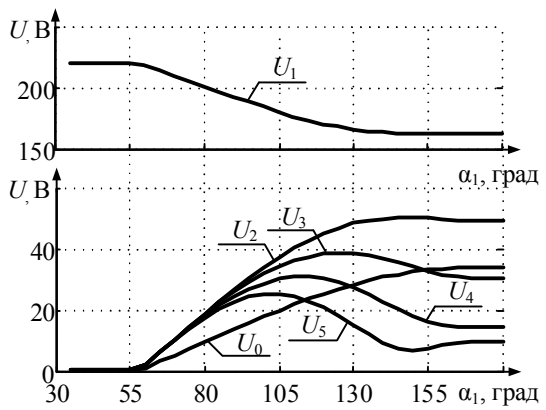


Рисунок 12 – Модуль різниці спектрів напруги між 4АП100 та 4А132М4 при α=120 °

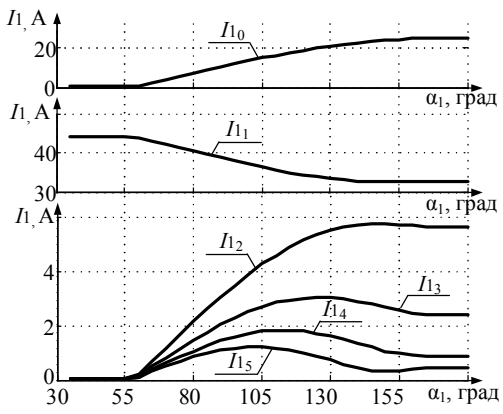
Для визначення залежності амплітуд перших п'яти гармонік від кута відкриття тиристора в схемі тиристор із зустрічним діодом (рис. 10) було проведено моделювання аналогічно попередньому. Кути α_1 відкриття тиристора VS1 знаходились у діапазоні від 30 до 180 °. Як дослідницький об'єкт був використаний двигун 4АП100.

Оскільки кут запирання діоду β_2 знаходиться в наступному періоді (рис. 11), то при умові $\beta_2>\alpha_1$ спектри сигналів струму й напруги матимуть у своєму складі лише одну гармоніку. Коли α_1 перевищує значення β_1, починають проявлятися інші гармоніки в спектрі. Можливий діапазон керування спектром даної схеми залежить від кута β, при якому діод не пропускає зворотній струм та може знаходитися від $\alpha_{гр}$ до 180 °, де нижня границя відкриття тиристора залежить від кута запирання.

На рис. 13,а зображено залежність напруги, а на рис. 13,б – струму. З рис. 13,а видно, що гармоніки, які мають найбільші амплітуди, – це нульова, перша й друга, амплітуда яких залежить від кута відкриття тиристора. Амплітуда першої гармоніки збільшується при зростанні значення α_1, друга гармоніка також збільшується до певного значення α_1, після його досягнення починає дещо зменшуватись. Значення постійної складової плавно зростає при збільшенні α_1. Амплітуди гармонік струму статорного кола (рис. 13,б) є пропорційними амплітудам гармонік напруги. У спектрі струму контуру намагнічування присутня постійна складова тієї ж величини, що й у статорному колі. Інші гармоніки мають відносно невеликі амплітуди (рис. 12,а). У роторному колі відсутня постійна складова, інші гармоніки мають меншу амплітуду, ніж гармоніки статорного кола (рис. 11,б). На рис. 13 зображено залежність амплітуд потужності на джерелі від кута відкриття тиристора.

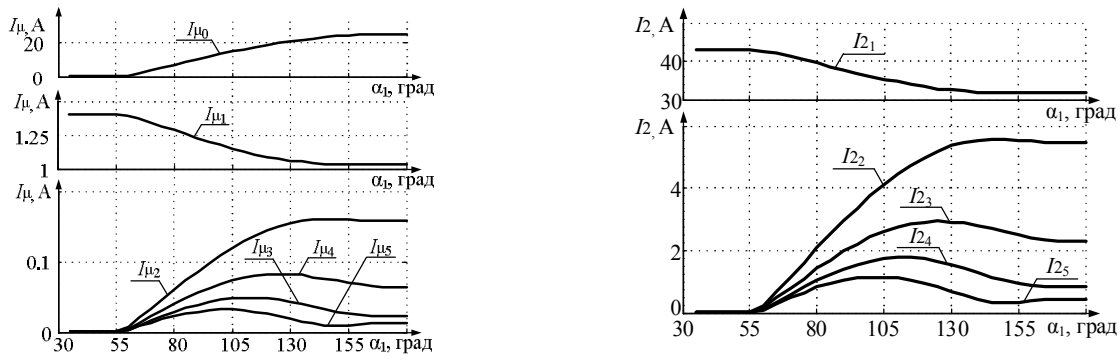


а)



б)

Рисунок 13 – Залежності амплітуд постійної складової та перших п'яти гармонік напруги (а) та струму статора (б) від кута відкриття тиристора для джерела полігармонічної напруги, побудованого на основі тиристора із зустрічно-паралельним діодом



а) б)

Рисунок 14 – Залежності амплітуд постійної складової та перших п’яти гармонік струму контуру намагнічування (а), струму роторного кола (б) для схеми тиристор із включеним зустрічно-паралельним діодом від кута відкриття тиристора

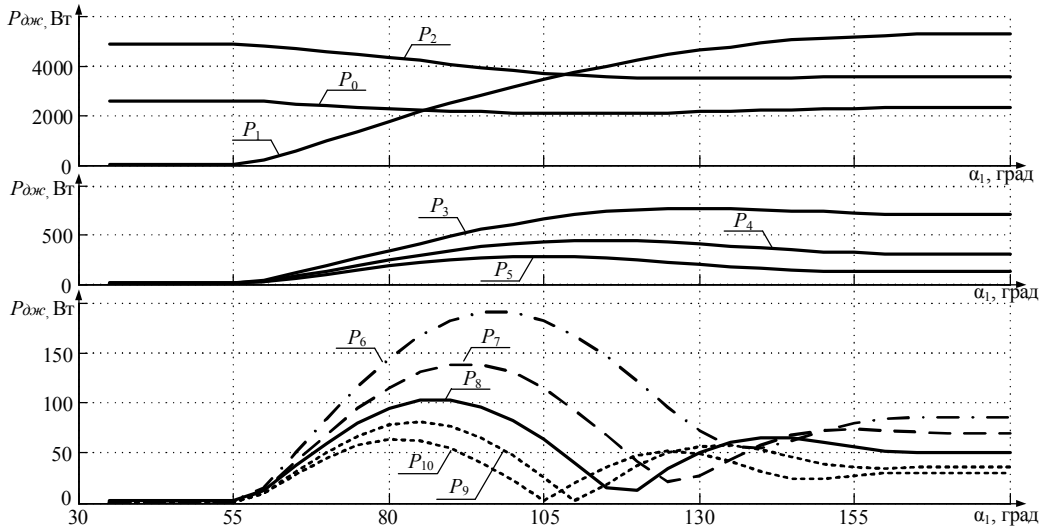


Рисунок 15 – Залежність амплітуд гармонік потужності джерела живлення від кута відкриття тиристора для схеми тиристор–діод

Кути керування для цієї схеми знаходяться в межі від $\alpha_{гр}$ до 180 °. При кутах, рівних 60–80 ° гармоніки струму й напруги мають відносно невелику різницю в амплітудах.

В електроприводі використовуються симетричні кути відкриття тиристорів ТРН. Це пов’язано з тим, що при несиметричних кутах відкриття тиристорів відбувається насичення магнітної системи двигуна, що негативно відбивається на ефективності роботи АД. Але при ідентифікації деяких параметрів АД (індуктивності контуру намагнічуванняя, опору роторного кола) присутність постійної складової є бажаним чинником.

Несиметричне керування тиристорами ТРН, де кути відкриття тиристорів α_1 і α_2 тиристорів VS1 та VS2 відповідно не є рівними між собою. До особливостей несиметричного керування, як і в перших двох схемах, належить насичення магнітної системи двигуна, яке напряму залежить від постійної складової в сигналі напруги. Оскільки при симетричному керуванні постійна складова відсутня або має мізерну величину, збільшення різниці між α_1 та α_2 призведе до збільшення насичення магнітної системи АД унаслідок зростання постійної складової, а, навпаки, при зменшенні різниці між кутами постійна складова зменшується.

Для визначення впливу кутів відкриття тиристорів на амплітуди гармонік струму напруги й потужності був проведений модельний експеримент із використанням двигуна 4АП100. Було обрано три значення кута відкриття α_1 для відкриття тиристора VS1, а саме: 90, 135, 170 °. Для кожного із значень кута α_1 кут α_2 приймав значення від 82 до 180 °. Алгоритм М-сценарію аналогічний першому (рис. 3) за винятком того, що як ітераційна величина використовувався кут α_2, а кут α_1 є константою. Для кожного значення α_1 проводився окремий модельний експеримент. Криві, що визначають амплітуди гармонік залежно від кутів α_1 та α_2, отримані в ході модельного експерименту, показано на рис. 16–20.

Як видно з графіків, при α_2 в діапазоні $\alpha_1 < \alpha_2$ постійна складова буде зменшуватися, а в діапазоні $\alpha_1 < \alpha_2 \leq 180$ °, навпаки, збільшуватись. Таким чином, можна регулювати насичення двигуна в доста-

тньо широких межах. У точці симетрії кутів χ, де кути відкриття тиристорів дорівнюють $\alpha_1 = \alpha_2$, спектр гармонік відповідає звичайному режиму роботи ТРН. Відповідно до проходження точки χ амплітуди парних гармонік та постійної складової будуть спадати, а після проходження точки χ їх амплітуди зростатимуть.

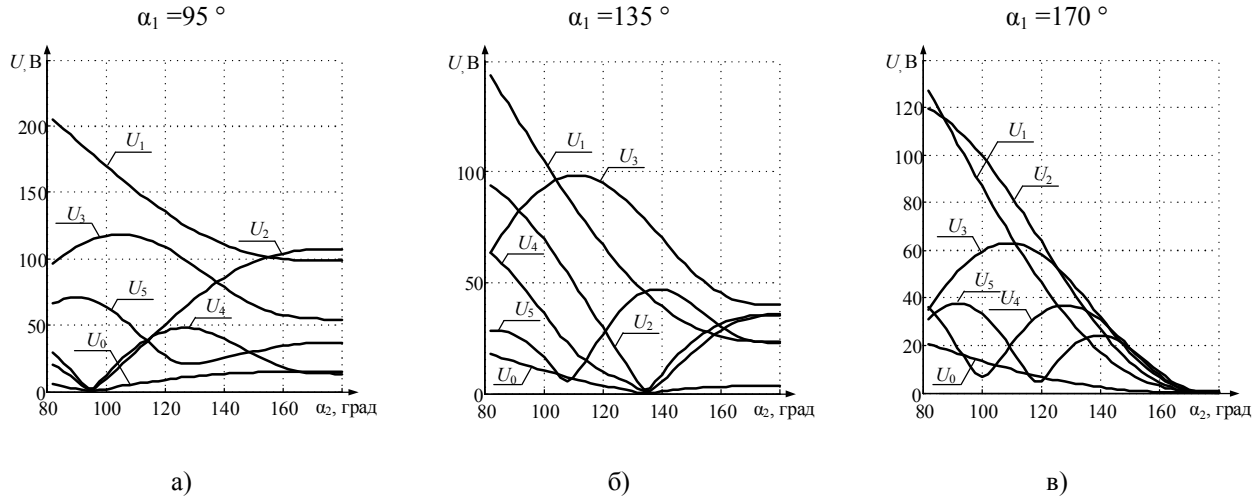


Рисунок 16 – Залежності амплітуд гармонік напруги при несиметричних кутах відкриття тиристорів:
а) α_1 =95 °, α_2 = 80–180 °; б) α_1 =135 °, α_2 = 80–180 °; в) α_1 =170 °, α_2 = 80–180 °

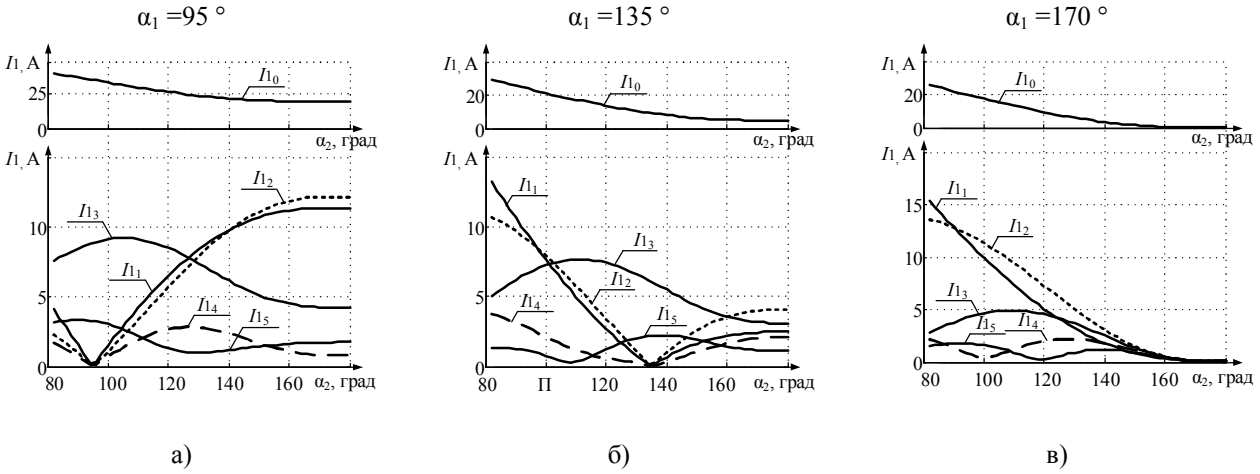


Рисунок 17 – Залежності амплітуд гармонік струму ротора при несиметричних кутах відкриття тиристорів:
а) α_1 = 95 °, α_2 = 80–180 °; б) α_1 =135 °, α_2 = 80–180 °; в) α_1 =170 °, α_2 = 80–180 °

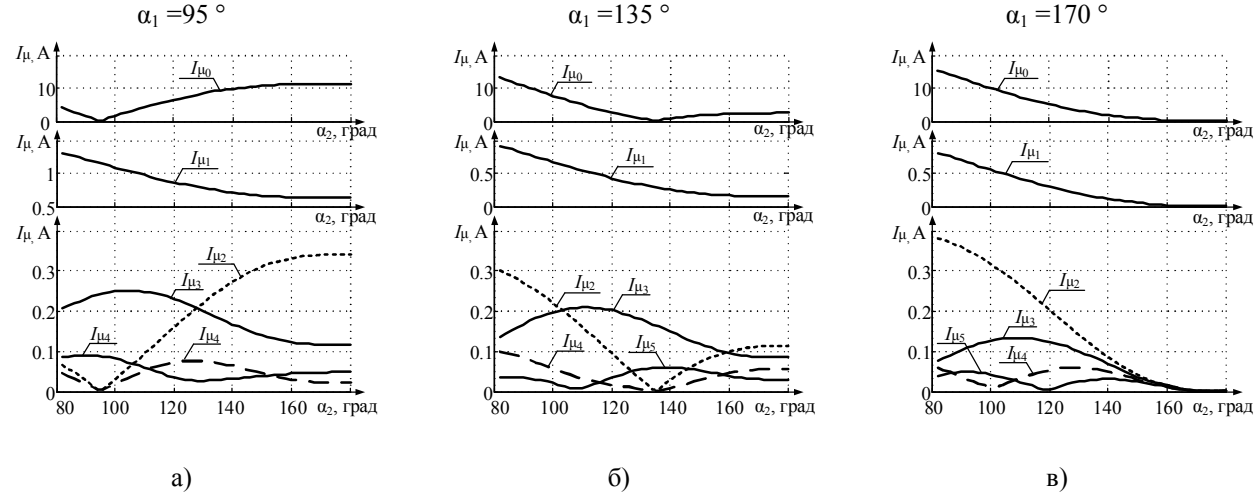


Рисунок 18 – Залежності амплітуд гармонік струму контура намагнічування при несиметричних кутах:
а) α_1 = 95 °, α_2 = 80–180 °; б) α_1 =135 °, α_2 = 80–180 °; в) α_1 =170 °, α_2 = 80–180 °

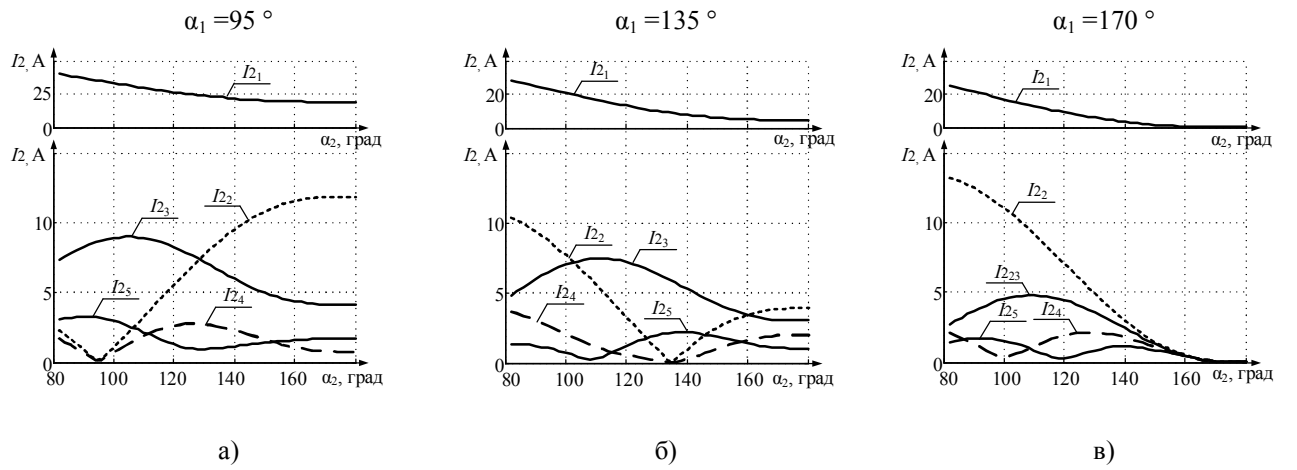


Рисунок 19 – Залежності амплітуд гармонік струму ротора при несиметричних кутах відкриття тиристорів: а) α_1 = 95 °, α_2 = 80–180 °; б) α_1 = 135 °, α_2 = 80–180 °; в) α_1 = 170 °, α_2 = 80–180 °

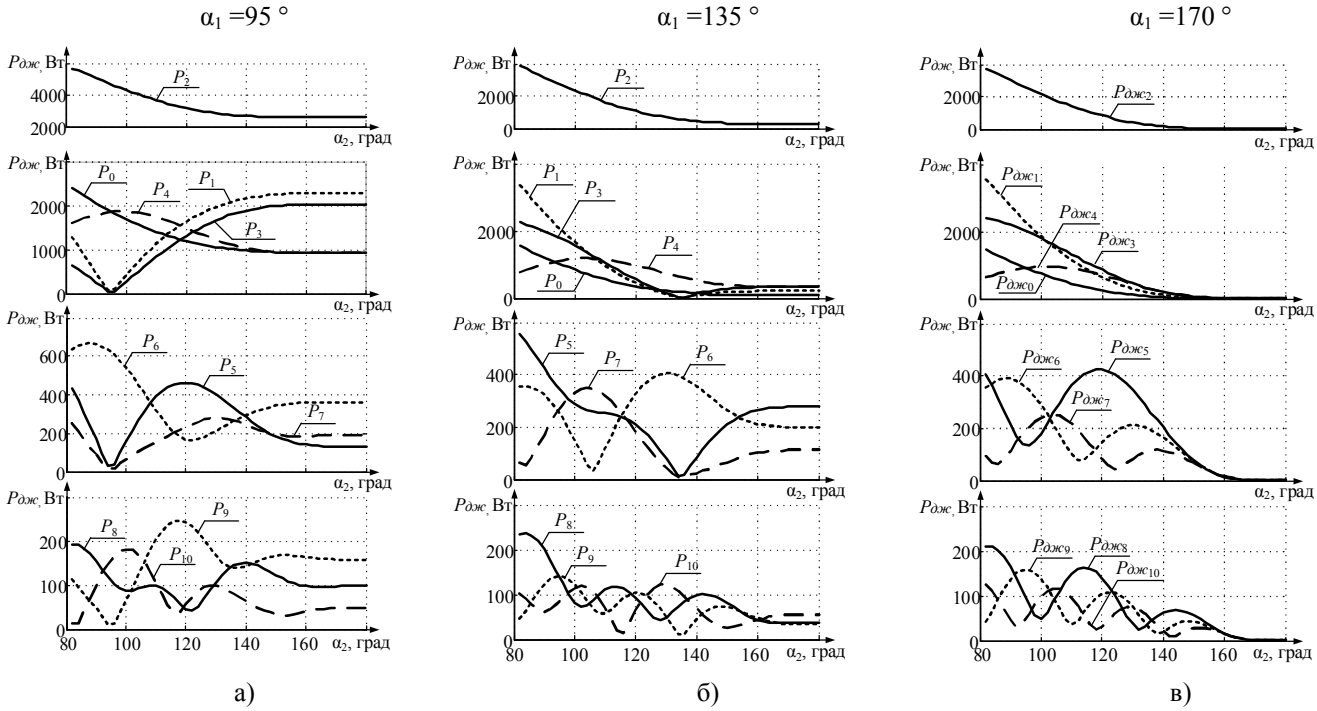


Рисунок 20 – Залежності амплітуд гармонік потужності джерела при несемитричних кутах керування: а) α_1 = 95 °, α_2 = 80–180 °; б) α_1 =135 °, α_2 = 80–180 °; в) α_1 =170 °, α_2 = 80–180 °

Несиметричне керування тиристорами ТРН дозволяє збільшити множину всіх можливих комбінацій відкриття тиристорів, що, у свою чергу, розширить і вибір оптимального гармонічного складу. Оптимальними кутами відкриття тиристорів, при якому амплітуди гармонік приблизно однакові, це α_2-10 °<α_1 < α_1+10 °.

Використання ТРН із несиметричним керуванням призводить до нестандартного режиму роботи двигуна, в якому почне насичуватися магнітопровід. Причиною цього служить постійна складова, що є невід'ємною частиною несиметричного керування. Регулювання рівня постійної складової важливе для ідентифікації нелінійних параметрів АД. Оскільки в модельних експериментах були використані лінійні елементи, але з урахуванням присутності постійної складової, є доцільним використання в контурі намагнічування нелінійного елементу з урахуванням кривої намагнічування, що становить додатковий інтерес та заслуговує окремої уваги.

Діапазон регулювання постійної складової та її поведінка є різною, в схемі з одним тиристором, при збільшенні кута відкриття тиристора α_1, постійна складова зменшується, в схемі тиристора із зустрічним діодом, навпаки, збільшується. Найбільші значення постійної складової з усіх схем можна отримати в першій схемі при мінімальних значеннях кута α_1. Ці дві схеми джерел полігармонічної напруги можна віднести до окремих випадків несиметричного керування ТРН. Для імітації першої схеми

керуючий сигнал відкриття тиристора слід подавати лише до першого тиристора, а другий тиристор завжди повинен перебувати в закритому стані, тобто не подавати до його керуючих електродів ніяких керуючих сигналів. У другій схемі, навпаки, другий тиристор повинен бути постійно відкритим, тобто керуючий сигнал має бути постійно прикладений до керуючого електроду. Несиметричне керування доцільно використовувати, оскільки дає можливість із більшою точністю регулювати гармонічний склад напруги, що пов'язано з великою кількістю варіацій кутів відкриття тиристорів.

ВИСНОВКИ. Запропоновано джерела полігармонічної напруги, побудованих на основі не повністю керованих ключів. Дослідження показали, що формування прийнятного полігармонічного сигналу з використанням не повністю керованих ключів є можливим та дозволяє уникнути використання більш дорогих способів формування полігармонічної напруги. З усіх розглянутих способів формування гармонічного складу на обмотці двигуна доцільно використовувати несиметричне керування тиристорами ТРН, оскільки він має більшу множину комбінацій кутів відкриття тиристорів. Інші розглянуті схеми є його окремими випадками, що дозволяє й далі використовувати силову частину однофазного ТРН. У майбутньому необхідно розробити програмно-апаратний комплекс по формуванню прийнятного гармонічного складу напруги на роторній обмотці двигуна під час досліду короткого замикання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загірняк М.В., Родькін Д.І., Ромашихін Ю.В. Чорний А.П. Енергетичний метод ідентифікації асинхронних двигунів: моногр. – Кременчук, 2013. – 164 с.

2. Родькин Д.Й., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.

3. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.

4. Огарь А.С. Источники питания для диагностики электрических машин с заданным гармоническим составом выходного напряжения. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2003. – Вип. 1 (18). – С. 167–169.

5. Родькин Д.И., Грядушкин С.А., Черный А.П. Обоснование параметров источников полигармонического питания для диагностики электрических машин переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2003. – Вип. 2 (19), част. 2. – С. 40–48.

6. Takeuchi T. Theory of SCR circuit and application to motor control. – Tokyo: Tokyo Electrical Engineering College Press, 1968. – 289 c.

7. Петров Л.П., Андрющенко О.А., Капинос В.И. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода. – М.: Энергоиздат, 1986. – 200 с.

8. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

9. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазным управлением. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

10. Герасимяк Р.П., Лещев В.А., Путилин Н.С. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. – К.: Техника, 1984. – 150 с.

11. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П.. Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: моногр. – Кременчуг, 2008. – 244 с.

12. Черных И.В. SIMULINK. Среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2004. – 288 с.

13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.

14. Attaway S. MATLAB. A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. – New York: Butterworth-Heinemann, 2011. – 518 c.

15. Sayood K. Learning Programming Using MATLAB. – Lincoln: Morgan & Claypool, 2007. – 81 c.

16. Magrab E.B., Azarm S., Balachandran B. et al. An Engineers Guide to MATLAB. – New York: Prentice Hall, 2010. – 848 c.

THYRISTOR AC VOLTAGE AS A POWER SOURCE IN THE SYSTEM OF IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTORS POWER METHOD

M. Bazyshyn, D. Rodkin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: bazyshyn.m.y@gmail.com

One of the conditions of use of the energy method is the formation of a polyharmonic voltage in the winding of asynchronous motor. As the source it was considered the thyristor voltage regulator. However, there are a number of outstanding sources of polyharmonic voltage based on not fully controllable keys, namely the explicit inclusion of only one thyristor per phase; a thyristor with antiparallel diode enabled; single-ended control keys thyristor voltage regulator. Due to the way of locking of thyristors, with identical opening angles on the engines with different parameters, the harmonic composition of the voltage can vary depending on the lock angle. In order to establish the dependence of the harmonic content of the voltage and current from the opening angle of the thyristors, the simulation of each of the

schemes was carried out. The polyharmonic voltage source consisting of a single thyristor, has the highest values of the amplitudes of the first and second harmonic voltages. It is a constant and the first component in the current in the stator winding. The source of formations on the thyristor counter-parallel diode forms a voltage, where the first harmonic as its part has the greatest amplitude, and in the current signal it is zero and the first harmonic. The control range starts from the angle at which the diode is locked, and lasts to the maximum possible opening angle of the thyristor. Of the options considered, the first two sources can be attributed to special cases of the asymmetric key controls of the thyristor regulator. Asymmetric control is purposeful because it will allow you to adjust the harmonic composition of the voltage more accurately, due to the large amount of variation of opening angles of the thyristors.

Key words: Thyristor naprugi, nesimetrichne keruvannya, healing of poligarmonichne.

REFERENCES

1. Zagirnyak, M., Rodkin, D., Romashihin, Yu. and Chornyi, O. (2013), *Energeticheskiy metod identifikatsii parametrov asinhronnih dvigateley* [Energy method for induction motors parameter identification], PE Shcherbatyh A.V., Kremenchug. (in Russian)

2. Rodkin, D.I. and Romashihin, Yu.V. (2007), "Capabilities and efficiency of the method of energy diagnosis for identification problems", *Sbornik nauchnyh trudov Dnepodzerzhinskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta,* Vol. 3, no. 26, pp. 507–512. (in Russian)

3. Rodkin, D. (1992), *Sistemy dinamicheskogo nagruzhenija i diagnostiki jelektrodvigatelej pri posleremontnyh ispytanijah* [Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors in the post-repair tests], Nedra., Moscow. (in Russian)

4. Ogar, A. (2003), "Istochniki pitaniya dlya diagno-stiki elektricheskih mashin s zadannym garmoniche-skim sostavom vyhodnogo napryazheniya", *Visnyk KDPU, Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 1, no. 18, pp. 167–169. (in Russian)

5. Rodkin, D., Gryadushkin, S., and Chornyi, O. (2003), "Justification polyharmonic power source parameters for the diagnosis of electrical machines AC", *Visnyk KDPU, Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 4, no. 19, pp. 40–48. (in Russian)

6. Takeuti, T. (1968), Theory of SCR circuit and application to motor con-trol, *Tokyo Electrical Engineering College Press,* Tokyo.

7. Petrov, L., Andrjushhenko, O., Kapinos, I. (1986), *Tiristorniye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo elektroprivoda* [Thyristor voltage converters for asynchronous electric], Energoizdat, Moscow. (in Russian)

8. Petrov, L. (1981), *Upravlenie puskom i tormozheniem asinhronnyh dvigateley* [Management of start-up and braking asynchronous motors], Energoizdat, Moscow. (in Russian)

9. Shubenko, V., Braslavsky, I. (1972), *Tiristorniy asinhronniy elektroprivod s faznym upravleniem* [Thyristor asynchronous electric drive with phase control], Energiya, Moscow. (in Russian)

10. Gerasimyak, R., Leshchev, V. and Putilin, N. (1984), *Asinhronniy elektroprivod s tiristornym upravleniem* [Asynchronous electric drive with thyristor controlled], Tehnika, Kiev. (in Russian)

11. Chornyi, O., Rodkin, D., Kalinov, A. and Vorobeychik, O. (2008), Monitoring parametrov elektricheskih dvigatelej elektromehanicheskih sistem [Monitoring parameters of electric motors electromechanical systems], PE Shcherbatyh A.V., Kremenchug. (in Russian)

12. Chernyh, I. (2004), *SIMULINK. Sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij* [SIMULINK. Wednesday the creation of engineering applications], DIALOG–MIFI, Moscow. (in Russian)

13. Chernyh, I. (2008), *SIMULINK. Modelirovanie elektrotehnicheskih ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink], DMK Press, St. Petersburg. (in Russian)

14. Attaway, S. (2011), MATLAB. A Practical Introduction to Programming and Problem Solving, Butterworth–Heinemann, New York.

15. Sayood, K. (2007), Learning Programming Using MATLAB, Morgan&Claypool, *Lincoln.*

16. Magrab, E.B., Azarm, S., Balachandran, B. et al. (2010), An Engineers Guide to MATLAB, Prentice Hall, New York.

Стаття надійшла 13.11.2015.