

УДК 621-926

ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ ЗАСОБАМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;
КОВАЛЬОВ О.Р. інженер, старший викладач кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;
НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри перекладу Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Мета роботи. Розробка схемного рішення та обґрунтування параметрів системи керування і силової частини перетворювача напруги живлення, за умов його експлуатації з підвищеним коефіцієнтом потужності і плавного або ступеневого способів регулювання енергоефективності асинхронного привода.

Методи досліджень. Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи схемотехнічного проектування автоматичних систем у компоненті Multisim із складу електронної лабораторії National Instruments, математичне моделювання у пакеті Matlab.

Отримані результати. Розроблено та побудовано цифрові моделі системи імпульсно-фазового керування для ступеневого і плавного регулювання напруги живлення двигуна із залученням способу широтно-імпульсної модуляції мережної напруги, надано рекомендації щодо рівня просідання навантаження, за якого потрібно зменшити напругу живлення, і її величина при релейному керуванні, а також випробувано систему плавного керування з координатно-фазовим управлінням шпаруватості для досягнення раціональної енергоефективності привода.

Наукова новизна. Обґрунтовано вибір межі перемикання релейного регулятора та рівень раціональної величини вихідної напруги перетворювача за якої досягається раціонально-енергоефективне керування приводом, запропоновано алгоритм визначення параметрів RC фільтруючого кола задля одночасного забезпечення найкращих умов комутації силових ключів перетворювача та здійснення безперервної компенсації реактивної потужності двигуна за умов експлуатації перетворювача із підвищеним коефіцієнтом потужності.

Практична цінність. Впровадження спрощеної системи перетворення із підвищеним коефіцієнтом потужності дозволить створити автоматичну систему асинхронного привода, завдяки якій можливо досягти збереження енергоресурсу на ланках двигуна, перетворювача та енергосистеми, за умов мінімальних капітальних вкладень на її виготовлення.

Ключові слова: тривалий режим роботи; мало-змінний графік навантаження; енергоефективне управління приводом; спрощена схема перетворювача мережної напруги; підвищений коефіцієнт потужності.

І. ВСТУП

Відомо, що переважна більшість існуючих промислових електроприводів будуються на базі традиційних асинхронних двигунів (АД), які завдяки відносно простій конструкції мають достатню надійність за одночасної невисокої енергоефективності у порівнянні із іншими електромеханічними системами. Зазвичай їх номінальний електричний ККД коливається у межах 70–92 % при коефіцієнті потужності 0,8–0,92, а його енергетичний ККД не перевищує 82 % [1]. Як наслідок, до 44 % споживної енергії витрачається на розігрів обмоток, елементів основної конструкції та розсіювання у навколишнє середовище потоків, що створюються електромагнітною системою асинхронного двигуна.

Методи сучасного підвищення ефективності асинхронних електроприводів передбачають створення систем «перетворювач частоти – асинхронний дви-

гун» (ПЧ–АД) або «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН–АД). Остання система, за відсутності вимоги регулювання швидкості і з точки зору капітальних вкладень на керуюче обладнання, має значну перевагу. Хоча слід підкреслити, що використання фазового способу управління мережною напругою зменшує коефіцієнт потужності тиристорного перетворювача і відповідно додає витрат енергії на ланці перетворення, що є неприпустимим.

Активно-індуктивний характер навантаження двигуна передбачає генерування у мережу реактивної потужності, що стає причиною її перевантаження і відповідно зростання витрат і на цій ланці енергосистеми.

Таким чином, основні проблеми на які слід спрямувати дослідження, – це безперервна компенсація реактивного опору двигуна, пошук більш досконалого схемного рішення та способу керування перетворювача напруги, який володіє високою енергети-

кою за умови прийнятної вартості на керуюче обладнання.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Світова енергетична стратегія останніх років спрямовувалась на впровадження технологій ощадності, у тому числі й в електромеханіці [2]-[4]. Зважаючи на це, розробниками електричного привода застосовуються різноманітні способи реалізації таких прагнень. До них слід віднести:

- використання методів підтримки економічної роботи механізмів тривалого режиму роботи шляхом стабілізації середнього коефіцієнта навантаження двигуна на рівні не менше 0,6 відносних одиниць [5], що за хаотичної зміни виробничої задачі не завжди можливо;

- залучення двигунів із підвищеним вмістом активних матеріалів [6], що дозволяє підвищити їх ККД не менше, як на 3-5 %. Хоча у цьому випадку розрахункова економія матиме місце тільки у разі мало-змінного навантаження і правильно налагодженого силового каналу;

- зниження мережних витрат централізованими фільтро-компенсуючими пристроями. Проте слід зауважити, що таким способом забезпечити сучасні вимоги до точності відпрацювання поставленої задачі фільтрації досить складно;

- перемикання схеми включення двигуна з трикутника на зірку на термін режимів холостого ходу або незначного завантаження [7]. Спосіб хоча і дає позитивний результат, але не дозволяє виконати раціональну наладку системи для створення найкращих умов енергозбереження;

- способи регулювання електропривода за допомогою силових перетворювачів [8]-[10] вважаються найбільш дієвими з точки зору енергоощадності. Але беручи до уваги те, що для механізмів тривалого режиму роботи [11], [12] використання частотного перетворювача досить дороге, є логічним впровадження на його місце тиристорних регуляторів напруги, як прийнятної альтернативи;

- використання комбінованого способу підвищення енергоефективності, наприклад, реалізація системи вентиляції локомотива [13], де частотне керування приводу вентилятора доповнюється підбором двигуна із зниженням значенням активно-реактивного опору ротора, адаптована до локомотивної енергосистеми і не завжди може бути застосована до інших промислових електромеханічних систем;

- залучення індивідуальних фільтро-компенсуючих пристроїв локального типу [1], що дозволяють розвантажити мережу і частково заощадити потужність живлення у двигуні, чого за нинішніх умов господарювання недостатньо;

- розробку сучасних алгоритмів керування частотних електроприводів провідних світових виробників [14], [15], що вирішують проблему енергоощадності але не знімають питання значних

початкових капітальних витрат на керуюче обладнання;

- синтез регуляторів для вирішення раціонального живлення привода в залежності від рівня навантаження [16]. На жаль, використання в системі керування напругою тиристорного регулятора не дозволяє знизити витрати енергії у перетворювачі, що є неприйнятним недоліком;

- залучення систем перетворення із підвищеним ККД, які базуються на принципах широтно-імпульсної модуляції керуючого сигналу [17]. Така система має досить складне схемне рішення, що відповідно стане причиною її високої вартості, а крім цього у роботі недостатньо приділяється уваги комутації ключів на активно-реактивне навантаження.

Із огляду можливо зробити наступний висновок, що для реалізації більш дієвої та доступної системи керування електромеханічної системи із тривалим режимом роботи, слід залучати регулятори напруги із спрощеною схемою керування і принципом широтно-імпульсної модуляції з урахуванням питань одночасної локальної компенсації реактивної потужності та вирішення питань комутації керуючих ключів.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка схемного рішення та обґрунтування параметрів системи керування і силової частини перетворювача напруги живлення за умови його експлуатації з підвищеним коефіцієнтом потужності і плавного або ступеневого способів регулювання енергоефективності асинхронного приводу.

IV. ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ Й АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Обґрунтування параметрів регулювання напруги. Виходячи із попереднього висновку витікає, що головна задача даної роботи полягає у розробці системи автоматичного регулювання, яка у режимі реального часу забезпечить на клеммах АД живильну потужність рівня, необхідного для подолання поточного навантаження двигуна. Із аналізу літературних джерел і за умови фінансової доступності системи впливає, що реалізація поставленої мети можлива у випадку використання ступеневого способу управління електроприводом.

Авторами пропонується розробка двохступеневої системи, яка працює або у номінальному режимі, або у режимі енергозбереження. Слідуючи Європейському досвіду, де привод електромеханічних систем тривалого режиму роботи експлуатують при навантаженні, що не менше за 60 % від номінального значення, слід обрати межу перемикання релейного регулятора саме на цьому рівні. Тобто, в інтервалі навантажень 1...0,6 номінального напруга живлення становить номінал, а якщо воно знижується менше ніж 0,6, система прибирає напругу до величини, що забезпечить раціональну ефективність АД.

Для визначення раціонального значення вихідної напруги у режимі перемикання перетворювача скористаємось матеріалом джерела [16]. Так, для двигуна 4A132M8Y3 встановленої потужності 5,5 кВт, номінальної швидкості обертання 750 об/хв, напруги живлення 220 В отримано залежності (рис.1), з яких

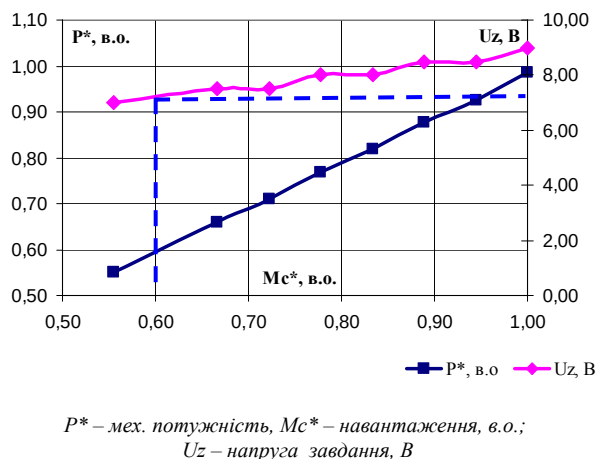
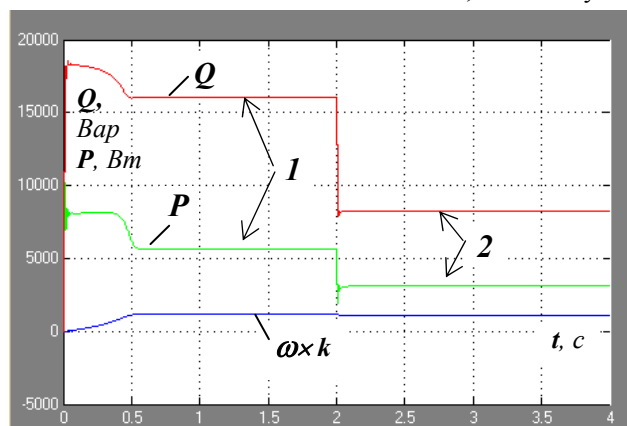


Рисунок 1. До визначення раціональної вихідної напруги перетворювача

слідуює, що при навантаженні у 60 % номінального завдання на вході перетворювача становить 7,2 вольт. Тобто, напруга перетворення, у цьому випадку, повинна становити 72 % вихідної номінальної, якщо прийняте максимальне вхідне значення напруги управління коливається у межах ± 10 вольт. Експериментальна перевірка працездатності запропонованого налаштування динамічної моделі демонструє (рис.2) зниження активної потужності на 44 %, а реактивної на 49 % за незмінного навантаження в 0,6 номіналу.

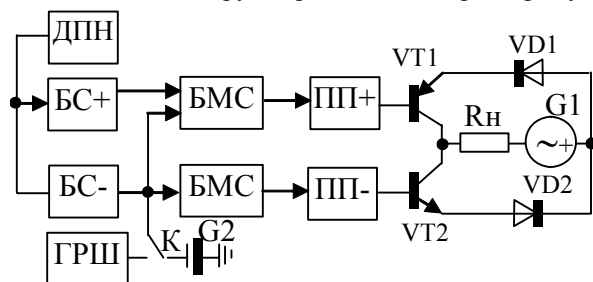


P – активна та Q – реактивна потужності;
 ω – кутова швидкість; $k=15$ – масштабний коефіцієнт

Рисунок 2. Дослідження сталого режиму АД за номінальної – 1 та зниженої – 2 напруги

Підхід до побудови схеми перетворення. Як відомо, суттєвим недоліком тиристорних регуляторів напруги із фазовим регулюванням є низький коефіцієнт потужності. На відміну від них, ШІМ перетворювачі мають кращі енергетичні показники, але їх суттєва конструктивна складність і відповідно висока вартість стримує розвиток цього напрямку систем електроприводу. Тому головною задачею роботи є розробка спрощеного схемного рішення ШІМ перетворювача задля регулювання енергоефективності приводу у залежності від падіння навантаження.

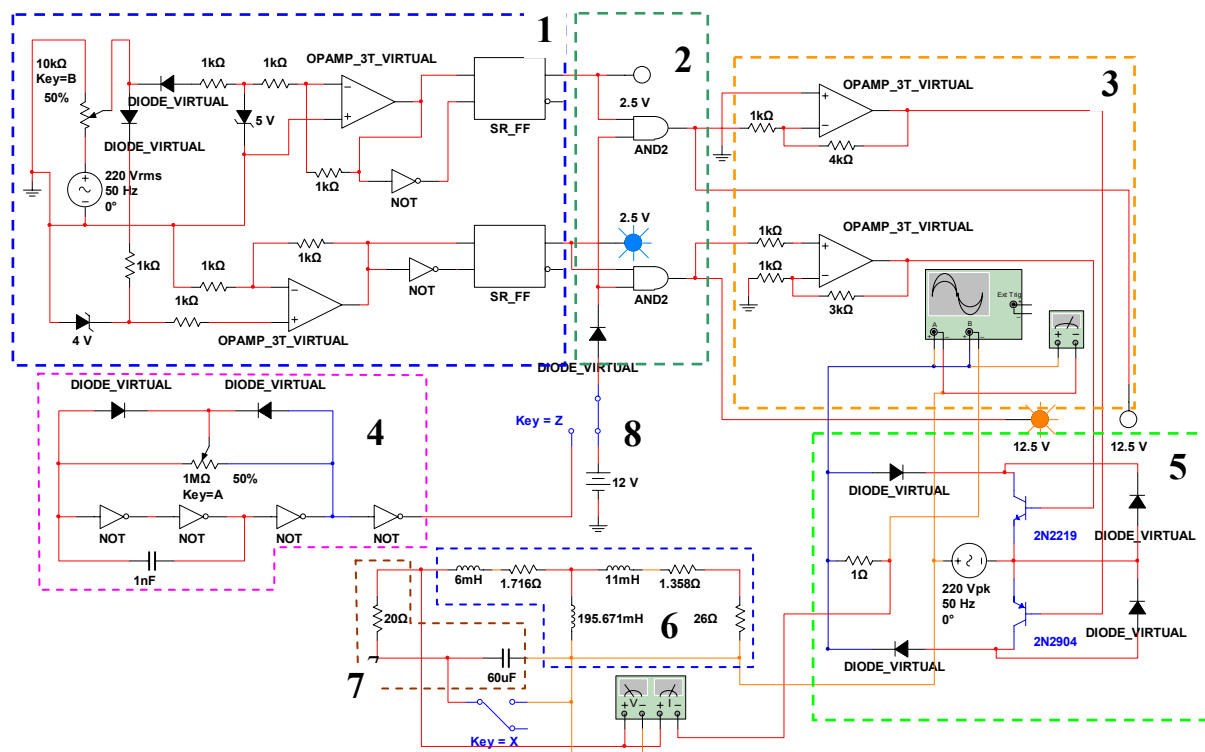
Для пояснення структури і роботи схемного рішення скористаємось функціональною схемою рис.3. Сигнал з датчика напруги промислової мережі фіксу-



ДПН – датчик мережної напруги; БС – блоки синхронізації; ГРШ – генератор регульованої шпаруватості;
БМС – блок модуляції сигналу; ПП – попередній підсилювач; R_n – навантаження; VT, VD – ключі та вентилі

Рисунок 3. Функціональна схема ШІМ перетворювача напруги

ється блоками синхронізації БС+ позитивної і БС- негативної напівхвилі та утримується у одиничному стані протягом усієї протяжності напівперіодів напруги живлення. Пульсуюча форма сигналів керування утворюється завдяки блокам модуляції БМС, виходи з яких відповідно подаються на попередні підсилювачі ПП+ та ПП- підтягнення потужності керування до рівня достатнього для управління силовими ключами VT1, VT2. Завдяки неодиновій провідності ключів VT1, VT2 та подачі керування у протифазі струм через навантаження R_n має синусоїдальну форму, а його регулювання здійснюється шляхом зміни шпаруватості генератора ГРШ. У нашому випадку, за ступеневого регулювання, шпаруватість одноразово налагоджується до початку роботи приводу на напругу, що визначена у попередньому підпункті, а далі користуючись релейним регулятором K здійснюють перемикання номінального режиму в положення приєднано до G2 або енергоефективного приєднано до ГРШ. Принципова схема системи імпульсно-фазового керування, реалізована засобами електронної лабораторії National Instruments складової Multisim, зображена на рис. 4. Показана схема вміщує один канал. Повний комплект у трифазному виконанні таких каналів повинен мати три, а їх синхронізація мусить здійснитись за кожною фазою окремо.



1 – синхронізація; 2 – блок модуляції; 3 – попередні підсилювачі; 4 – генератор регульованої ширини імпульсів; 5 – силовий блок; 6 – навантаження; 7 – ланцюг компенсації; 8 – релейний регулятор

Рисунок 4. Модель ШІМ системи ступеневого керування енергоефективністю АД

Визначення параметрів кола компенсації навантаження. Попереднє випробування системи перетворення (рис.4) на активне навантаження дали досить хороші результати. Регулювання напруги вдалося здійснити плавно й у широкому діапазоні. У випадку роботи перетворювача на активно-реактивне навантаження, де у якості споживача обрано схему заміщення (рис.5) асинхронного двигуна 4A100L4Y3

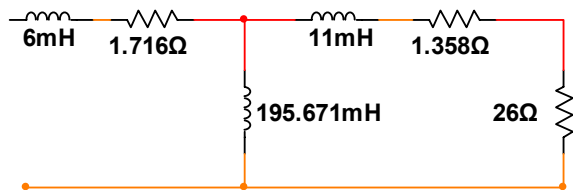


Рисунок 5. Схема заміщення АД 4A100L4Y3 сталого режиму

потужності 4 кВт швидкості обертання 1000 об/хв і номінальної напруги живлення 220 вольт, виявило повну його непрацездатність, що фіксувалось у вигляді значних кидків напруги при кожному перемиканні силових ключів. При цьому експеримент здійснювався для сталого режиму за номінального ковзання $s=0,05$, де опір ротору розраховано за рівнянням $r_2 \times (1-s)/s = 26 \text{ Ом}$. Зрозуміло, що аварійна робота пе-

ретворювача пов'язана з виникненням викидів енергії, яка накопичується на індуктивностях електричної машини.

Компенсувати наслідки такого стану роботи перетворювача пропонується завдяки RC кола, що приєднується у паралель до клем живлення схеми заміщення. Визначення параметру ланки компенсації пропонується за такою послідовністю:

- згортання опору схеми заміщення у комплексному вигляді

$$Z_L = 20.826 + 12.047j, \text{ Ом},$$

де $j = \sqrt{-1}$;

- прирівнювання $x_L = x_C$ і визначення з цього рівняння ємності, де активний опір залишається на рівні 20,826 Ом. При такому розрахунку ємність компенсації дорівнює 228,5 мкФ на фазу двигуна.

- визначена ємність забезпечує коефіцієнт потужності рівний майже 1, що при змінах навантаження може призвести до перекомпенсації системи. Тому на цьому етапі будується залежність коефіцієнта потужності від величини компенсуючого конденсатора, ємність якого знижують від визначеної розрахункової до рівня мінімально прийнятої, де $\cos(\varphi) = 0,88$;

- далі за графіком залежності обирається мінімальна ємність конденсатора за раціонально обраного $\cos(\varphi)$.

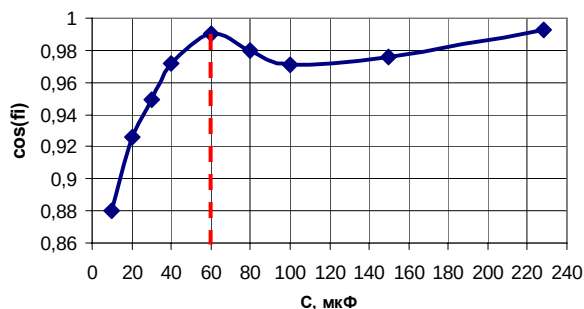
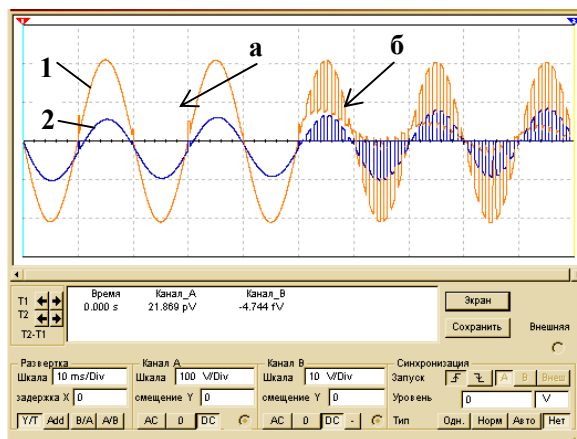


Рисунок 6. Експериментальна залежність до визначення раціональної ємності

За запропонованим алгоритмом отримана залежність рис.6, з якої раціональна ємність становить 60 мкФ. При перевірці роботи перетворювача можливо спостерігати, що у режимах номінальний (рис.7, а) кидки напруги в моменти переходу з позитивного напівперіода у негативний мають допустимий рівень, а ефективний (рис.7, б) - широтно-імпульсна модуляція має вигляд майже такий, як і при роботі перетворювача на активне навантаження.

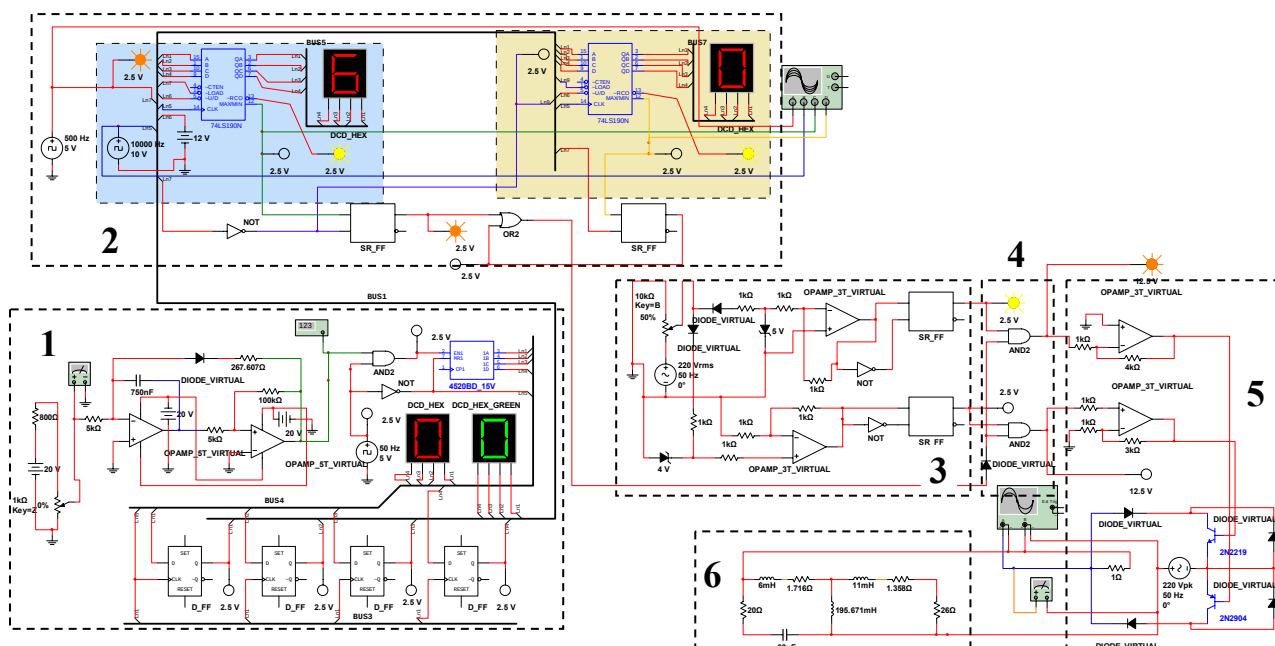
Отже, отримані залежності рис. 7 наглядно демонструють стійку роботу системи за умови надійної комутації силових ключів та підтримки $\cos(\varphi)$ системи на рівні не гіршому за 0,987.



1 – вихідна напруга, масштаб 100 В/ділення;
2 – струм навантаження, масштаб 10 А/ділення;
режими а – номінальний, б – енергоефективний

Рисунок 7. Експериментальна залежність роботи перетворювача на реактивне навантаження

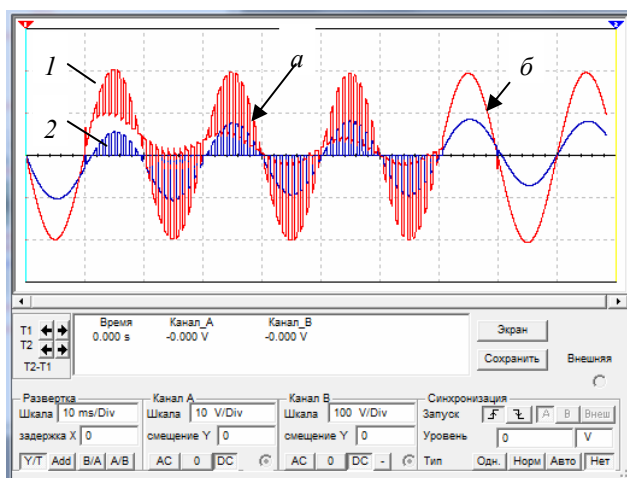
Схемне рішення щодо плавного керування. Проробка питання щодо більш точного відпрацювання регулювання енергоефективності асинхронного електропривода показала, що плавне управління має переваги, хоча у цьому випадку слід погодитись на складність, меншу надійність, а найголовніше - підвищену початкову вартість перетворювача. Тому для промисловців, які згодні на такі умови може бути запропонована система із координатно-фазовим регулюванням шпаруватості [18] і додатковим індивідуальним фільтро-компенсуючим пристроєм, що розроблений у цій роботі. Схемне рішення, що реалізує таку систему,



АЦП; 2 – фазові таймери; 3 – мережна синхронізація; 4 – модулятори; 5 – силовий блок; 6 – навантаження

Рисунок 8. Модель перетворювача із плавним регулюванням

наведене на рис.8, а його завершеність буде за наявності в системі нелінійного регулятора корекції ефективності [16] в залежності від навантаження.



– напруга, масштаб 100 В/ділення;
– струм, масштаб 10 А/ділення;
Режими а – регулювання; б – номінальний

Рисунок 9. Результати моделювання за плавного регулювання

Результуючі залежності (рис.9) випробування схеми (рис.8) не відрізняються від залежностей, які показані на рис.7, що дає підстави стверджувати, що система плавного керування працює також стійко і без проблем комутації із безперервною компенсацією реактивної потужності. При цьому коефіцієнт потужності в обох випадках залишається на рівні не гірше 0,987.

V. ВИСНОВКИ

Умови теперішнього часу вимагають максимальної ефективності АД привода, яка може бути досягнута за створення умов миттєвої подачі в двигун такої кількості енергії, яка не перевищує необхідної для подолання поточного навантаження, використання двигунів із підвищеним ККД, компенсації реактивної потужності індивідуальними фільтро-компенсуючими пристроями та застосування перетворювачів із високим коефіцієнтом потужності.

Наріжний принцип розробки - низькі капітальні вкладення, які здійсненні за умови простоти схемного рішення систем перетворення мережної напруги. Реалізація цього можлива у випадку ступеневої системи керування перетворювача.

За сучасного розвитку перетворювальної техніки достатній коефіцієнт потужності забезпечує саме система з широтно-імпульсною модуляцією мережної напруги.

Номінальним інтервалом варіювання навантаження слід вважати від 1...0,6 номінального, що відповідає Європейському досвіду. А межа менше за 60 % номінального навантаження є прийнятною для перемикання перетворювача у режим енергозбереження.

При цьому найкраща енергоефективність двигуна досягається за вихідної напруги перетворювача в 72 % номінального.

Визначення параметрів ланцюга компенсації слід здійснювати у послідовності:

- згортання опору схеми заміщення двигуна;
- визначення ємності конденсатора із реактивної складової згорнутого опору схеми заміщення, а активну складову при цьому залишають незмінною;
- побудова залежності коефіцієнта потужності системи від ємності конденсатора за даними експерименту, де варіювання останньої здійснюється у межах від розрахункової до мінімально прийнятої за $\cos(\varphi) = 0,88$;
- з графіку залежності встановлення раціональної ємності RC ланцюга, яка відповідає обраному $\cos(\varphi)$.

Експериментальним чином доведено стійкість обох систем керування за кращих умов комутації силових ключів та отримання коефіцієнта потужності рівня не гірше за 0,987.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мугалимов Р.Г. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей / Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова – Магнитогорск: Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – № 2 (34). – 2011. – С. 59-64.
- [2] Стратегия энергосбережения в Украине: аналитически-справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / за ред. В.А. Жовтнянського, М.М. Куліка, Б.С. Стогнія – К.: Академперіодіка, 2006. – Т. 1. – 510 с.
- [3] Клепиков В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ»: Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 18–21.
- [4] Бешта О.С., Півняк Г.Г. та ін. Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих територій. Монографія. / О.С.Бешта, Г.Г. Півняк та ін. – Дніпропетровськ, НГУ, 2013. – 220 с.
- [5] Козярук А.Е. Метод и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». – 2015. – Т.15, №1. – С. 47-53. DOI: 10.14529 / power 150106.
- [6] Новая высокоэффективная серия асинхронных двигателей 7AVE, ее модификации и специализированные исполнения / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды

- VIII Междунар. (XIX Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизир. электроприводу. – Саранск, 2014. – С. 239-243.
- [7] Бабокин Г.И. Оценка экономии электрической энергии в нерегулируемом асинхронном электроприводе путем переключения обмоток статора // ГИАБ. 2005. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruемом-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (дата обращения: 08.07.2019).
- [8] Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков: под ред. И.Я. Браславского. – М.: Академия. 2004 – 256 с.
- [9] Vasilev B. Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons / B. Vasilev // Electrotechnic and computer systems. – 2014. – № 15(91). – P. 220-223.
- [10] Kozyaruk A. Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units / A. Kozyaruk, B. Vasil'ev // Russian Electrical Engineering. February. – 2013. – Vol. 84. – Iss.2. – P.94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077
- [11] Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов— М.: Машиностроение, 2013. — 176 с.
- [12] Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 256 с.
- [13] Дзенис С.Е. Выбор асинхронного двигателя привода вентилятора тепловоза с условием обеспечения его устойчивой работы // С.Е. Дзенис, В.В. Шевченко, О.О. Ханин – Харьков: Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 4(45) – С. 92-96.
- [14] Казачковский Н.Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты Altivar 21. / Н.Н. Казачковский // Гірничая електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – 2018 – Вип. 100.– С. 69 – 72.
- [15] Бабокин Г.И. Оценка экономии энергетической энергии в системе регулятор напряжения асинхронный двигатель / Г.И. Бабокин // ГИАБ. - 2006. - №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyy-dvigatel-1> (дата обращения: 08.07.2019).
- [16] Бородай В.А. Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації швидкості / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова // Електротехніка та електроенергетика – Запоріжжя: – 2019. – № 3.– С. 16-23. DOI 10.15588/1607-6761-2019-3-2
- [17] Горбунов Р.Л. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей / Р.Л. Горбунов, Г.И. Посконный // Известия Томского политехнического университета – 2014. - Т. 324. № 4.– С. 76-86.
- [18] Бородай В.А. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 95. – С 54 – 58.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2020

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА СРЕДСТВАМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

БОРОДАЙ В.А.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального ТУ „Днепропетровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;
КОВАЛЁВ А.Р.	инженер, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Национального ТУ „Днепропетровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;
НЕСТЕРОВА О.Ю.	канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры перевода Национального ТУ „Днепропетровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Цель работы. Разработка схемного решения и обоснование параметров системы управления и силовой части преобразователя напряжения питания при условии его эксплуатации с повышенным коэффициентом мощности и плавного или ступенчатого способов регулирования энергоэффективности асинхронного привода.

Методы исследования. Для проведения исследований использованы положения теории электрических машин, методы схемотехнического проектирования автоматических систем в компоненте Multisim из состава электронной лаборатории National Instruments, математическое моделирование в пакете MatLab.

Полученные результаты. Разработаны и построены цифровые модели систем импульсно-фазового управления для ступенчатого и плавного регулирования напряжения питания двигателей с применением способа широтно-импульсной модуляции сетевого напряжения, даны рекомендации к уровню просадки нагрузки, при котором необходимо уменьшить напряжение питания и его величины при релейном управлении, а также испытана система плавного регулирования с координатно-фазовым управлением скважности для достижения рациональной энергоэффективности привода.

Научная новизна. Обоснован выбор предела переключения релейного регулятора и уровень рациональной величины выходного напряжения преобразователя, при котором достигается рационально-энергоэффективное управление приводом, предложен алгоритм определения параметров RC фильтрующей цепи для одновременного обеспечения наилучших условий коммутации силовых ключей преобразователя и осуществления непрерывной компенсации реактивной мощности двигателя, при условии эксплуатации преобразователя с повышенным коэффициентом мощности.

Практическая ценность. Внедрение упрощенной системы преобразования с повышенным коэффициентом мощности позволит создать автоматическую систему асинхронного привода, благодаря которой возможно достичь сбережения энергоресурса на участках двигателя, преобразователя и энергосистемы, при условии минимальных капитальных вложений на её изготовление.

Ключевые слова: длительный режим работы; мало меняющийся график нагрузки; энергоэффективное управление асинхронным приводом; упрощенная схема преобразователя сетевого напряжения; увеличенный коэффициент мощности.

PARAMETRIC CONTROL OF EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS DRIVE BY MEANS OF CONVERTER WITH THE INCREASED POWER FACTOR

BORODAI V.A.

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

KOVALOV O.R.

Engineer, Senior Lecturer of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;

NESTEROVA
O.YU.

PhD, Associate Professor of the Translation Department, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Purpose. Development of circuit solution and substantiation of parameters of control system and power part of power supply converter, provided its operation with high power factor and smooth or stepwise methods of energy efficiency control of asynchronous drive.

Methodology. The provisions of the theory of electric machines, methods of circuit design of automatic systems in the Multisim component of the National Instruments electronic laboratory, mathematical modeling in the Matlab package were used for research.

Findings. Digital models of pulse-phase control systems for stepwise and smooth regulation of the supply voltage of motors using the method of pulse-width modulation of the mains voltage have been developed and built, recommendations are given for the level of load sagging, at which it is necessary to reduce the supply voltage and its magnitude with relay control, and also tested a smooth control system with coordinate-phase duty cycle control to achieve rational energy efficiency of the drive.

Originality. The choice of the switching limit of the relay regulator and the level of rational value of the converter output voltage is substantiated, at which rational and energy-efficient control of the drive is achieved, the algorithm for determining the RC filtering circuit parameters is proposed to ensure simultaneously the best conditions for switching the converter power switches and the implementation of continuous compensation of the engine reactive power, provided that the converter is operated with an increased power factor.

Practical value. The introduction of a simplified conversion system with a high power factor will create an automatic asynchronous drive system, through which it is possible to achieve energy conservation at the engine, converter and power system, with minimal capital investment in its production.

Keywords: Long operating mode; slightly changing load schedule; energy-efficient asynchronous drive control; simplified circuit of the mains voltage converter; increased power factor.

REFERENCES

- [1] Mugalimov, R.G. (2011). Modelirovanie pokazatelej jenergojeffektivnosti variantov jelektroprivodov promyshlennyh ustanovok na osnove primenenija

tradicionnyh i kompensirovannyh asinhronnyh dvigatelej [Modeling of energy efficiency indicators of electric drive options of industrial plants based on the use of traditional and compensated asynchronous mo-

- tors]. *Bulletin of MSTU. G. I. Nosova*, 2 (34), 59-64. (in Russian)
- [2] Zhovtnyansky, V.A., Kulik, M.M., Stogniya, B.S. (2006). Strategija jenergosberezhenija v Ukraine: analiticheskispravochnye materialy v 2-h tomah. Obshhie osnovy jenergosberezhenija [Energy saving strategy in Ukraine: analytical and reference materials in 2 volumes. General principles of energy saving]. *Academiperiodic*, 1, 510.
- [3] Klepikov, V.B., Rozov, V.Yu. (2010). O roli jelektroprivoda v reshenii problemy jenergoresursosberezhenija v Ukraine [On the role of the electric drive in solving the problem of energy saving in Ukraine]. *Bulletin of NTU "KPI": issue "Problems of an automated electric drive. Theory and practice"*, 28, 18-21.
- [4] Beshta, O.S., Pivnyak, G.G., etc. (2013). Ekonomichnij ekologichni aspekty kompleksnoi' generacii' ta utylizacii' energii' v umovah urbanizovanyh terytorij. Monografija [Economic and environmental aspects of integrated generation and utilization of energy in urbanized areas. Monograph]. *Dnipropetrovsk, NMU*, 220.
- [5] Kozaruk, A.E., Vasiliev, B.Yu. (2015). Metod i sredstva povyshenija jenergojeffektivnosti mashin i tehnologij s asinhronnym jelektroprivodom [Method and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drive]. *Bulletin of SUSU. Ser. "Energy"*, 15, 1, 47-53. DOI: 10.14529/power150106. (in Russian).
- [6] Bepalov, V.Ja. (2014). Novaja vysokoeffektivnaja serija asinhronnyh dvigatelej 7AVE, ee modifikacii i specializirovannye ispolnenija [New high-performance series of 7AVE asynchronous motors, its modifications and specialized versions]. *Trudy VIII Mezunar. (HIH Vseros.) nauch.-tehn. konf. po avtomatizir. jelektroprivodu. – Saransk*, 239-243. Kobelev, A.S., Kruglikov, O.V., Makarov, L.N. (in Russian).
- [7] Babokin, G.I. (2005). Ocenka jekonomii jelektricheskoy jenerгии v nereguliruemom asinhronnom jelektroprivode putem pereklyuchenija obmotok statora [Estimation of electrical energy savings in unregulated asynchronous electric drive by switching the stator windings]. *GIAB*, 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian).
- [8] Braslavsky, AND I., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov V.N. (2004). Jenergosberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive]. *Academy*, 256. (in Russian)
- [9] Vasilev, B. (2014). Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons. *Electrotechnic and computer systems*, 15(91), 220-223.
- [10] Kozyaruk, A. (2013). Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering, February*, 84, Iss.2., 94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077. Vasilyev, B.Yu., Kozaruk, A.
- [11] Leznov, B.S. (2013). Chastotno-reguliruemyy jelektroprivod nasosnyh ustanovok [Variable Frequency Electric Pumping Units]. *Engineering*, 176. (in Russian)
- [12] Leznov, B.S. (2006). Jenergosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnyh i vozdushnyh ustanovkah [Energy saving and controlled drive in pump and air units]. *Energoatomizdat*, 256. (in Russian)
- [13] Dzenis, S.E., Shevchenko, V.V., Hanin, O.O. (2015). Vybora asinhronnogo dvigatelja privoda ventiljatora teplovoza s uslovijem obespechenija ego ustojchivoj raboty [Selection of asynchronous motor of drive of diesel locomotive fan with the condition of ensuring its stable operation]. *Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 4(45), 92-96.
- [14] Kazachkovsky, N.N. (2018). Sopostavlenie zakonov chastotnogo upravlenija na primere preobrazovatelja chastoty Altivar 21 [Comparison of the laws of frequency control. Case study of the frequency converter Altivar 21]. *Girnichia elektromehanika that automation*, 100, 69-72.
- [15] Babokin, G.I. (2006). Ocenka jekonomii elektricheskoy jenerгии v sisteme reguljatora napryazhenija asinhronnyj dvigatel' [Evaluation of energy saving in the system voltage regulator - asynchronous motor]. *GIAB*, 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyatora-napryazheniya-asinhronnyj-dvigatel-1> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian)
- [16] Borodaj, V.A. (2019). Sposib sintezu reguljatora energoeffektivnogo upravlinnja asinhronnim privodom mehanizmiv bez prjamoj stabilizacii shvidkosti [Method for synthesis of energy efficient control controller for asynchronous drive of mechanisms without direct speed stabilization]. *Electrical engineering and electric power*, 3, 16-23.
- [17] Gorbunov, R.L. (2014). Issledovanie trehfaznogo shirotno-impul'snogo preobrazovatelja peremennogo napryazhenija dlja povyshenija jenergojeffektivnosti asinhronnyh dvigatelej [Study of a three-phase pulse-width converter of alternating voltage to increase the energy efficiency of induction motor]. *News of Tomsk Polytechnic Universit*, 324, 4, 76-86. (in Russian)
- [18] Borodaj, V.A. (2015). Shirotno-impul'snyj reguljator s koordinatno-fazovym upravleniem skvazhnosti. [Pulse-width regulator with coordinate-phase duty cycle control]. *Mining. Electromechanics and automation*, 95, 54-58.