

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

КОВАЛЬОВА ЮЛІЯ ВІКТОРІВНА



УДК 621.313.004.67

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ  
З ТИРИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України, м. Харків

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Ягуп Валерій Григорович,**  
Харківський національний університет  
міського господарства  
імені О.М. Бекетова,  
професор кафедри систем  
електропостачання та  
електроспоживання міст

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Гриб Олег Герасимович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри автоматизації  
енергосистем

доктор технічних наук, доцент  
**Саприка Олександр Вікторович,**  
Харківський національний технічний  
університет сільського господарства  
імені Петра Василенка,  
професор кафедри технотроніки та  
теоретичної електротехніки

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р. о \_\_\_ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Електроприводи постійного струму з тиристорними перетворювачами напруги (ТПН) потужністю 0,5-2000 кВт широко використовують в механізмах з необхідністю регулювання швидкості. Асинхронні електроприводи з ТПН потужністю до 100 кВт найчастіше використовують в турбомеханізмах (вентилятори і насоси). Електроприводи з (ТПН) являють собою самостійний клас електроприймачів, які за приблизними підрахунками споживають біля 10% від виробленої електроенергії.

Характерною особливістю роботи електроприводів з ТПН є споживання реактивної потужності, яка погіршує їх енергоефективність, оскільки передача реактивної електроенергії пов'язана з втратами активної потужності на всіх ділянках електропередач. Загальновідомим засобом компенсації реактивної потужності є конденсатори, перевагами яких над напівпровідниковими компенсуючими пристроями є низька вартість та простота в експлуатації. Виходячи з вищевикладеного, науково-практична задача підвищення енергоефективності електроприводів з ТПН за рахунок компенсації реактивної потужності конденсаторами є актуальною, що визначило напрям дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами і планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова відповідно до завдань держбюджетної НДР МОН України «Енергоефективність і надійність систем передачі та споживання електричної енергії» (ДР № 0111U010507), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності електроприводів з тиристорними перетворювачами напруги шляхом зменшення втрат електроенергії в електромережах за рахунок компенсації реактивної потужності.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- проаналізувати та вибрати теорії реактивної потужності при несинусоїдних режимах для електроприводів з ТПН;
- розробити метод визначення реактивного струму асинхронних електроприводів з ТПН з урахуванням кута керування тиристорів;
- розробити метод визначення реактивного струму електроприводів постійного струму з ТПН з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої кола якоря та постійної складової випрямленого струму;
- отримати аналітичні співвідношення для визначення ємності конденсаторів для компенсації реактивної потужності електроприводів з ТПН;
- визначити коефіцієнт корисної дії двигунів при живленні від ТПН та надати рекомендації для практичного використання компенсованих асинхронних електроприводів з ТПН.

*Об'єкт дослідження* – процеси споживання реактивної потужності електроприводів з ТПН.

*Предмет дослідження* – методи і засоби компенсації реактивної потужності на основі аналізу параметрів режимів роботи електроприводів з ТПН.

**Методи дослідження.** При виконанні поставлених завдань використовувались: теорія електроприводу та теорія електричних машин для аналізу складових повної потужності; теорія електричних кіл для розробки рівнянь балансу потужностей; метод імітаційного моделювання процесів споживання і компенсації реактивної потужності в програмному пакеті Matlab; метод найменших квадратів та метод планування експерименту для апроксимації отриманих на моделях числових залежностей; метод співставлення результатів отриманих на моделях з експериментальними даними, отриманими на лабораторному стенді.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- удосконалено метод визначення діючого значення реактивного струму асинхронного електропривода з ТПН, який відрізняється тим, що для заданого кута керування тиристорів аналітично визначаються кут вимикання і кут провідності тиристорів, діюче значення струму холостого ходу і коефіцієнт реактивного струму як відношення реактивної складової до повного струму;

- вперше запропоновано метод для визначення діючого значення реактивного струму електроприводів постійного струму з однофазним та трифазним тиристорними випрямлячами, який враховує кут керування тиристорів, електромагнітну сталу кола якоря, постійну складову випрямленого струму якоря і режим струмів: переривисті або безперервні;

- отримали подальший розвиток співвідношення для визначення ємності компенсуючих конденсаторів для заданого кута керування тиристорів, які відрізняються тим, що враховують: для асинхронних електроприводів з ТПН - діюче значення реактивної складової струму холостого ходу статора; для тиристорних електроприводів постійного струму – діюче значення змінної складової випрямленого струму кола якоря;

- удосконалені аналітичні співвідношення для визначення коефіцієнтів корисної дії двигунів при тиристорному керуванні, які відрізняються тим, що враховують: для асинхронних електроприводів – відношення квадрату діючого значення першої гармоніки струму до квадрату діючого значення струму статора; для електроприводів постійного струму - відношення квадрату постійної складової випрямленого струму якоря до квадрату його діючого значення.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі електроенергетики полягає у зменшенні втрат електроенергії в лініях електропередач і в трансформаторах підстанцій за рахунок компенсації реактивної потужності електроприводів з ТПН.

Результати дисертаційної роботи передані в ДП "Науково-дослідницький інститут "ХЕМЗ" (м. Харків), ТОВ "ПСК Енергобуд" (м. Харків), а також використовуються у навчальному процесі кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетові у лекційних курсах "Електропостачання та

електрозбереження" та при дипломному проектуванні студентів спеціальності "Електротехнічні системи електроспоживання".

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: методи визначення діючого значення реактивного струму асинхронного електропривода з ТПН та діючого значення реактивного струму електроприводів постійного струму з однофазним та трифазним тиристорними випрямлячами; аналітичні співвідношення для визначення ємності компенсуючих конденсаторів для асинхронних електроприводів з ТПН і для тиристорних електроприводів постійного струму; аналітичні співвідношення для визначення коефіцієнтів корисної дії двигунів при тиристорному керуванні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати, що виносяться на захист, доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (Алушта, 2013 р.); «Енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві (Харків, 2014 р.); «Новітні технології в електроенергетиці» (Харків, 2015 р.); на XXXVII та XXXVIII науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів і співробітників ХНУМГ імені О.М. Бекетова (Харків, 2014-2015 р.р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 10 наукових публікаціях, з них: 7 - у наукових фахових виданнях України, 1 - у закордонному періодичному фаховому виданні, 1- патент України на корисну модель, 1 – у матеріалах конференції.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та додатку. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок; з них 65 рисунків та 49 таблиць по тексту; 9 рисунків на 3 сторінках; 8 таблиць на 4 сторінках; список використаних джерел зі 143 найменувань на 16 сторінках; 1 додаток на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність та доцільність виконаної роботи, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, практичне значення та реалізація результатів дисертації, наведено дані про їх апробацію та публікацію.

У першому розділі проведений аналіз силових схем електроприводів асинхронних та постійного струму з тиристорними перетворювачами напруги, які споживають реактивну потужність. Вирішенню питань визначення реактивної потужності узагальненого електроприймача при несинусоїдних режимах присвячені чисельні роботи фахівців в галузі електроенергетики. З відомих теорій для електроприводів з ТПН найбільш прийнятні теорії реактивної потужності Budeanu С. та Fryze S. Реактивна потужність згідно теорії Budeanu С. є сума добутків діючих значень гармонік напруги, струму і синуса кута зсуву фаз між ними, тобто  $Q = \sum U_k I_k \sin \varphi_k = \sum I_k^2 X_k$ . Реактивний струм,

названий в теорії Fryze S. пасивним, є складова споживаного струму, на величину якого зменшується споживання струму з мережі при його компенсації, тобто  $I_n^2 = I_a^2 + I_p^2$ , де  $I_n, I_a, I_p$  - повний струм, активна і реактивна складові повного струму. Таким чином, доцільним є удосконалення вищенаведених теорій для визначення реактивної потужності електроприводів з ТПН.

У другому розділі для асинхронного електроприводу з ТПН отримані рівняння балансу потужності статора  $\dot{U}_{sk} I_{sk}^* = R_s I_{sk}^2 + jX_{s\sigma k} I_{sk}^2 + jX_{sok} I_{sk}^2$  і ротора  $\dot{E}_{rk0} I_{rk}^* \approx R_r I_{rk}^2 + X_{r\sigma k} I_{rk}^2 + M_1 \omega_r$  в комплексній формі для окремих гармонік, де  $\dot{U}_{sk}, \dot{I}_{sk}, \dot{E}_{rk0}, \dot{I}_{rk}$  - комплекси діючих значень гармонік напруги і струму статора, струму ротора і ЕРС ротора при нульовій швидкості ротора;  $R_s, X_{s\sigma k}, X_{sok}$  - активний опір та реактивні опори статора;  $R_r, X_{r\sigma k}$  - активний опір та реактивний опори ротора;  $M_1, \omega_r$  - перша гармоніка моменту та швидкість ротора. В рівнянні для ротора прийнято, що крутний момент створюється першими гармоніками магнітного потоку статора і струму ротора. З урахуванням принципу суперпозиції для миттєвих активних  $p$  і реактивних  $q$  потужностей отримано рівняння балансу потужностей двигуна  $R_s \sum I_{sk}^2 + j \sum (X_{s\sigma k} I_{sk}^2) + j \sum (X_{sok} I_{sk}^2) \approx R_r \sum I_{rk}^2 + j \sum (X_{r\sigma k} I_{rk}^2) + M_1 \omega_r$ , яке відповідає закону збереження електроенергії і дозволяє обґрунтувати споживання реактивної потужності асинхронним електроприводом з ТПН.

Реактивна потужність  $q$  асинхронного двигуна складається з реактивних потужностей намагнічування  $q_o$  і розсіювання  $q_\sigma$  статора і ротора. Реактивна потужність розсіювання не перевищує 8% від реактивної потужності намагнічування. При навантаженні реактивна потужність розсіювання збільшується, але при цьому пропорційно зменшується реактивна потужність намагнічування. Тому реактивна потужність асинхронного електропривода з ТПН визначається в режимі неробочого ходу при ковзанні ротора  $s=0,02$ , тобто не враховується реактивна потужність розсіювання.

Асинхронний електропривод з ТПН описується нелінійною системою рівнянь, тому дослідження реактивної потужності проведено в програмному пакеті Matlab на моделі (рис. 1).

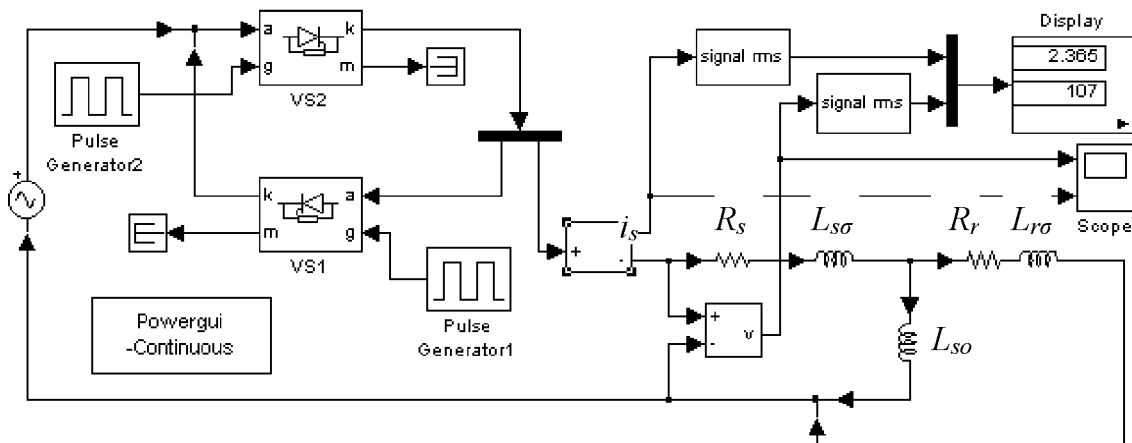


Рисунок 1 – Імітаційна Matlab-модель асинхронного електропривода з ТПН

В моделі асинхронний двигун представлений класичною Т-подібною схемою заміщення, а ТПН представлений тиристорами VS1,VS2 з системою імпульсно-фазового управління на блоках Pulse Generator для формування керуючих імпульсів на тиристорі. Для ілюстрації достовірності моделі на рис. 2 представлені осцилограми напруги і струму статора, що отримані на моделі (а) і експериментальні осцилограми (б), що отримані на лабораторному стенді.

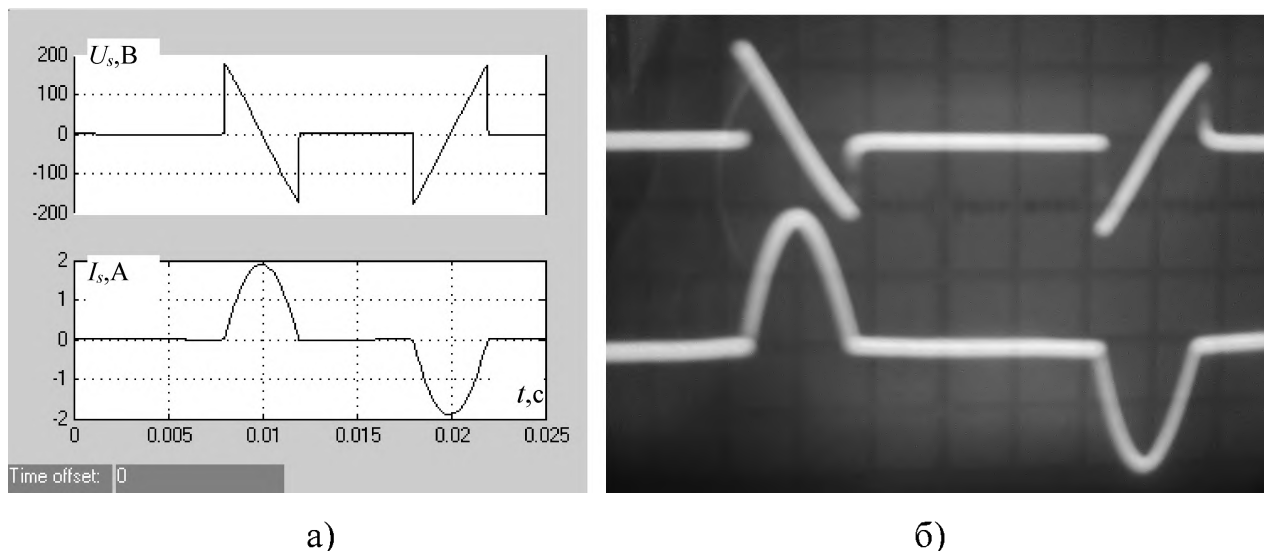


Рисунок 2 - Осцилограми напруги та струму статора, отримані на моделі (а) і експериментально (б)

Осцилограми (рис. 2) показують, що тиристори залишаються у відкритому стані при негативній нарузі електромережі під дією струму, спричиненого електрорушійною силою (ЕРС) самоіндукції обмотки статора. Це реактивний струм, оскільки протікає зустрічно ЕРС мережі, тобто, повертається в електромережу. Виходячи з цього, сформульовано визначення терміну реактивного струму асинхронного електропривода з ТПН з урахуванням його фізичних ознак, а саме: реактивний струм асинхронного електропривода з ТПН - складова струму неробочого ходу, яка споживається з електромережі і повертається в електромережу через перетворення в магнітний потік в обмотках статора згідно закону повного струму та в ЕРС самоіндукції згідно закону електромагнітної індукції Фарадея.

Повний струм неробочого ходу статора складається з активної і реактивної складових. Визначення залежності діючого значення реактивної складової струму від кута керування тиристорів проведено на Matlab-моделі (рис.3). Модель містить зворотній діод  $D_{obr}$  для виділення реактивної складової струму, вимірювачі струму мережі "current актив", струму зворотного діода "current реактив" і повного струму "current total" та блоки "signal rms" для розрахунку їх діючих значень. В схемі моделі використаний один тиристор, але відношення діючого значення струму зворотного діода до повного струму буде дорівнювати випадку з двома тиристорами, оскільки вказані струми зменшуються пропорційно.

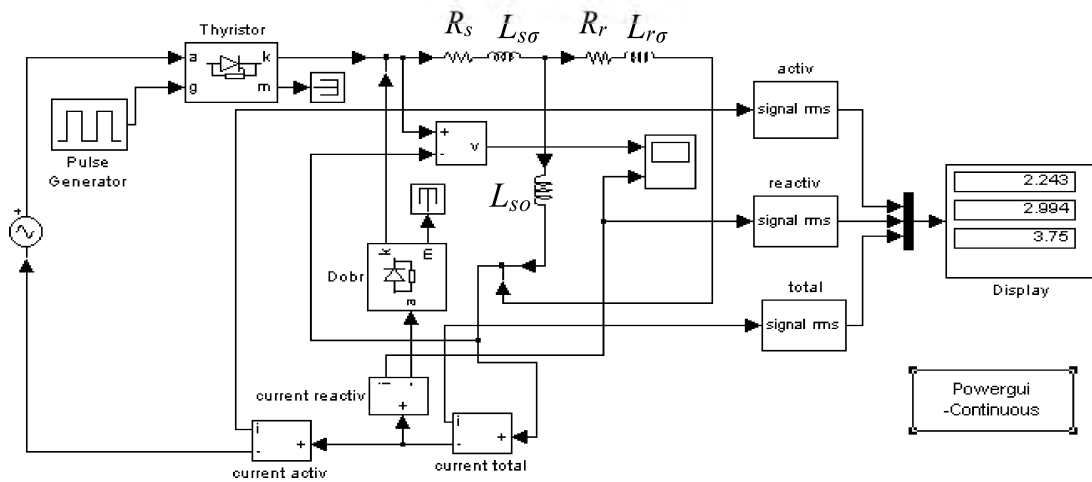
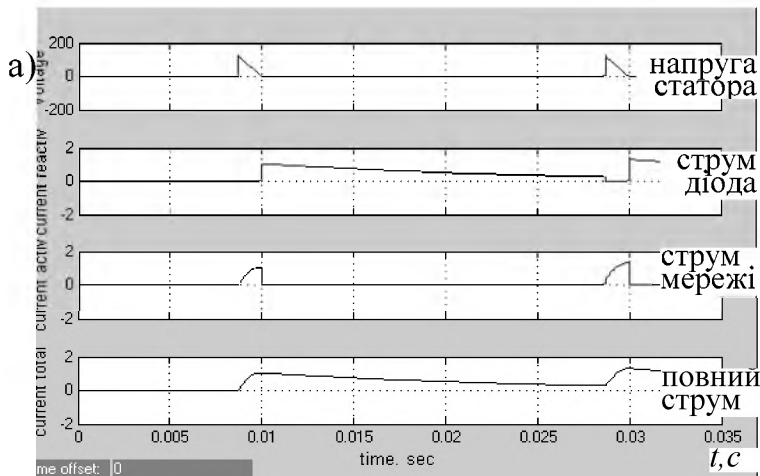


Рисунок 3 - Імітаційна Matlab-модель для розрахунку діючого значення реактивної складової струму неробочого ходу

На рис.4 показані осцилограми, отримані на моделі (а) і експериментально (б).



б)

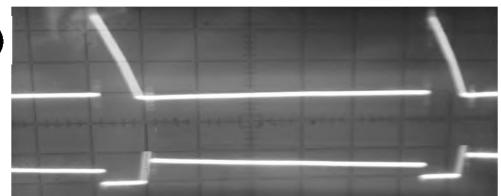


Рисунок 4 - Осцилограми отримані на моделі (а) і експериментально (б)

З осцилограм видно, що напруга статора не має негативних ділянок і співпадає за фазою зі струмом мережі, отже це є активний струм. При вимкненому тиристорі через зворотній діод протікає струм від ЕРС самоіндукції і не повертається в електромережу. Згідно теорії Fryze S. це є реактивний струм. Окрім цього осцилограми струму відповідають 1-му закону Кірхгофа.

За результатами моделювання побудовані графіки залежності реактивного і повного струмів від кута керування тиристорів (рис. 5). Дослідження показали, що для асинхронних двигунів потужністю до 11 кВт відношення реактивного струму до повного струму неробочого ходу є величина постійна з похибкою до 0,5%. Тому введено поняття коефіцієнта реактивного струму  $K_{pad} = I_p / I_X$  для визначення реактивного струму асинхронного електропривода з ТПН за формулою  $I_p = K_{pad} \cdot I_X$ . Залежність коефіцієнта реактивного струму від кута керування тиристорів представлена графіком (рис. 6), який апроксимований формулою  $K_{pad} = 0,675 + 0,1 \cdot \alpha$  за методом найменших квадратів.



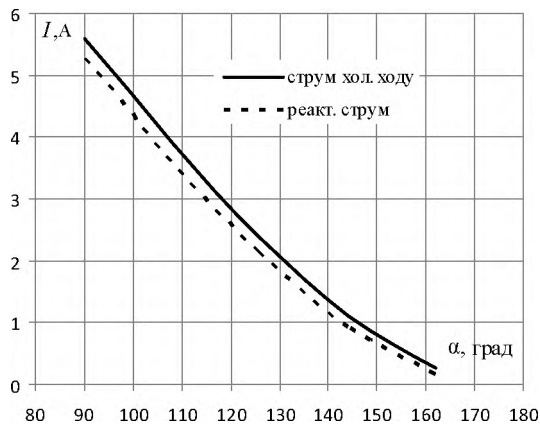


Рисунок 5 - Графіки залежності струму холостого ходу і його реактивної складової від кута керування

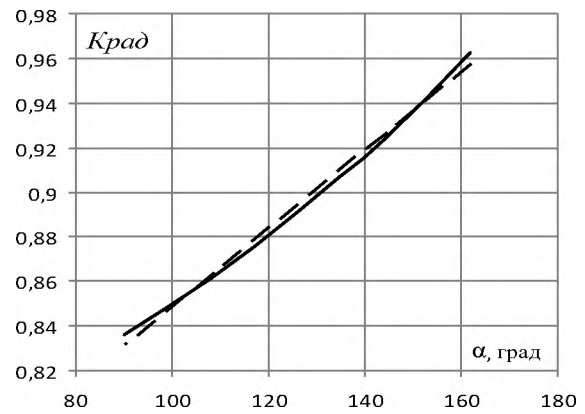


Рисунок 6 - Графіки залежності  $K_{rad}$  від кута керування розраховані на моделі (суцільна) і за формулою (пунктирна)

Тоді діюче значення реактивного струму визначається за формулою  $I_p = K_{rad} \cdot I_X = (0,675 + 0,1 \cdot \alpha) I_X$ , де  $I_X$  - повний струм холостого ходу, залежність якого від кута  $\alpha$  необхідно визначити. З відомої формули миттєвого значення струму холостого ходу при тиристорному керуванні отримана формула діючого значення струму холостого ходу

$$I_X = \frac{U_m}{Z} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \lambda - \frac{\sin 2(\alpha + \lambda - \varphi)}{2} + \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{2} \right] + \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi} \{ e^{-\lambda \operatorname{ctg} \varphi} [\operatorname{ctg} \varphi \cdot \sin(\alpha + \lambda - \varphi) + \cos(\alpha + \lambda - \varphi)] - \operatorname{ctg} \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi) \} + \frac{\sin^2(\alpha - \varphi)}{2 \operatorname{ctg} \varphi} (1 - e^{-2\lambda \operatorname{ctg} \varphi})},$$

де  $Z = \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}$ ,  $\varphi$  - модуль повного опору обмотки статора та кут зсуву струму від напруги при синусоїдному живленні;  $\lambda$  - кут провідності тиристорів в радіанах, який при  $\alpha = \varphi$  стає рівним  $\lambda = \pi$  і струм стає синусоїдним. Кут провідності тиристорів дорівнює  $\lambda = \pi - \alpha + \beta$ , де  $\beta$  - невідомий кут вимикання тиристорів відносно заднього фронту синусоїди напруги. Залежність кута  $\beta = f(\alpha)$  визначено на моделі (рис.7), яка працює наступним чином. Контроль досягнення заднім фронтом струму нульового значення виконується блоком Hit Crossing, який в цей момент формує керуючий імпульс для запуску підпрограми блоку Triggered Subsystem з блоком Simout для передачі поточного часу у робочу область Workspace. Поточний час відраховує блок Clock. Величина кута  $\beta$  для кожного значення кута  $\alpha$  розраховується як інтервал часу між моментами досягнення нуля задніми фронтами осцилограм напруги і струму. Дослідження на моделі показали, що залежність  $\beta = f(\alpha)$  для асинхронних двигунів потужністю до 11 кВт величина постійна з похибкою до 0,6% і тому може бути використана для розрахунку кута  $\lambda$ . Залежність кута  $\beta = f(\alpha)$  апроксимована за методом найменших квадратів формулою  $\beta = 2,875 - 0,916 \cdot \alpha$ .

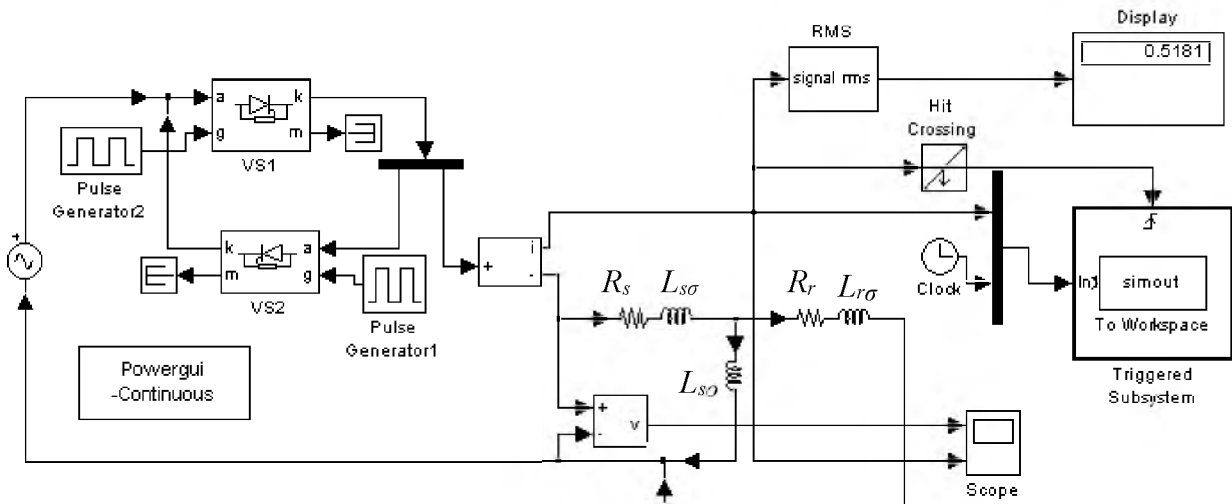


Рисунок 7 - Імітаційна Matlab-модель для розрахунку кута вимикання тиристорів

Таким чином, запропоновано метод визначення діючого значення реактивного струму, який полягає у наступному: для заданого кута  $\alpha$  керування тиристорами визначається: 1) кут керування тиристорів (середній); 2) кут вимикання тиристорів; 3) кут провідності тиристорів; 4) параметри схеми заміщення асинхронного двигуна; 5) діюче значення струму неробочого ходу; 6) коефіцієнт реактивного струму; 7) діюче значення реактивного струму за формулою  $I_p = K_{pad} \cdot I_X$ .

У третьому розділі проведені дослідження реактивної потужності електроприводу постійного струму з ТПН. Для цього коло якоря, згідно принципу суперпозиції, представляється у вигляді двох схем заміщення для постійних і гармонійних складових напруги і струму (рис.8).

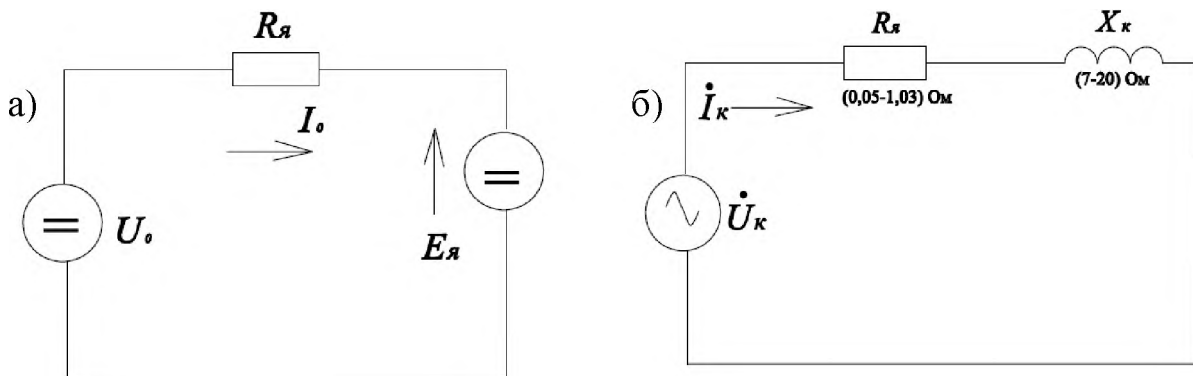


Рисунок 8 - Схеми заміщення кола якоря для постійної а) та гармонійних складових б)

Після додавання потужностей схем заміщення для постійних і гармонійних складових напруги і струму отримується рівняння балансу потужності для кола якоря в комплексній формі  $U_o I_o + \sum (\dot{U}_k I_k^*) = R_a (I_o^2 + \sum I_k^2) + M \omega_a + j \sum (X_k I_k^2)$ , де  $U_o, I_o, U_k, I_k$  – постійні та гармонійні складові напруги і струму якоря,  $R_a, \omega_a$  – опір та швидкість якоря. Ліва частина рівняння є повна потужність, підведена до кола якоря від тиристорного випрямляча. Перші два члени правої частини являють собою

активну потужність, яка перетворюється в теплову і механічну роботу, третій член є реактивна потужність згідно теорії Budeanu  $\sum (I_k^2 X_k) = \sum U_k I_k \sin \varphi_k$ . Оскільки реактивна потужність створюється змінною складовою випрямленого струму, то введено поняття реактивного струму тиристорного електроприводу постійного струму, тобто, це діюче значення змінної складової випрямленого струму якоря  $\sqrt{\sum I_k^2}$ , яка споживається з електромережі і повертається в електромережу через перетворення в магнітний потік в обмотках якоря згідно закону повного струму та в ЕРС самоіндукції згідно закону електромагнітної індукції Фарадея. Для визначення її діючого значення  $\sqrt{\sum I_k^2}$  введено поняття коефіцієнта реактивного струму  $K_{pi} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_o = \sqrt{I_{Я}^2 - I_o^2} / I_o$ , де  $I_{Я}, I_o$  - діюче значення випрямленого струму та його постійна складова. Реактивний струм створюється реактивною напругою. Для визначення її діючого значення  $\sqrt{\sum U_k^2}$  введено поняття коефіцієнта реактивної напруги  $K_{pU} = \sqrt{\sum U_k^2} / U_o = \sqrt{U_{Я}^2 - U_o^2} / U_o$ , де  $U_{Я}, U_o$  - діюче значення випрямленої напруги та її постійної складової. Таким чином, для визначення реактивної потужності кола якоря необхідно визначити коефіцієнти реактивного струму і напруги, які залежать від трьох факторів: кута  $\alpha$  керування тиристорами, електромагнітної сталої часу  $T_{Я}$  кола якоря і постійної складової випрямленого струму  $I_o$ , яка відповідає струму навантаження. Складний характер цих залежностей виключає можливість отримання їх в аналітичній формі, тому проведено моделювання процесів споживання реактивної потужності двигуном постійного струму з однофазним ТПН на імітаційній моделі (рис. 9). Коло якоря двигуна представлено активним опором  $R_{Я}$ , індуктивністю  $L_{Я}$  та електрорушійною силою  $E_{Я}$ .

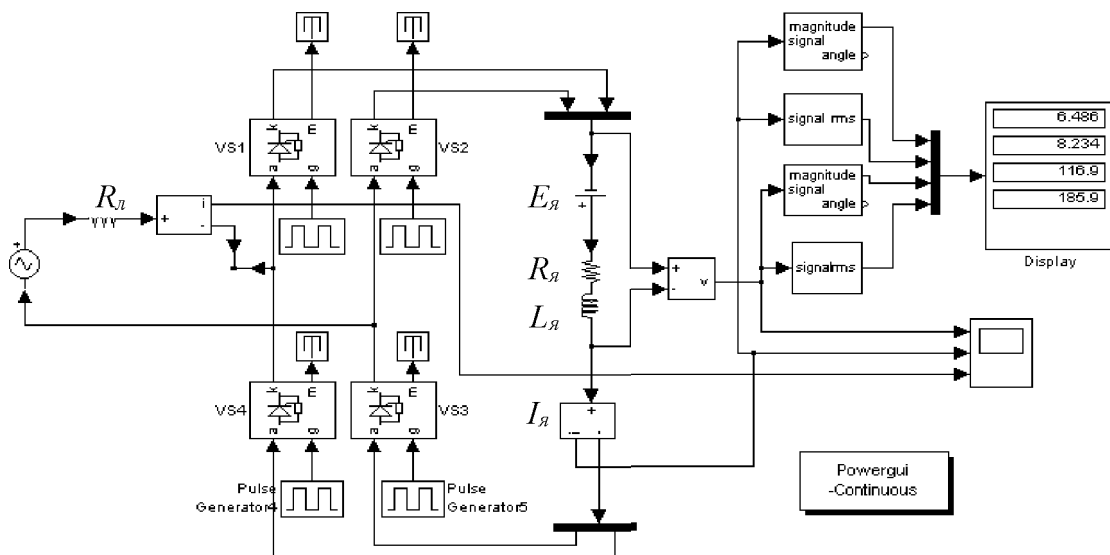


Рисунок 9 - Імітаційна Matlab-модель електроприводу постійного струму з однофазним тиристорним випрямлячем

На рис. 10 показані експериментальні (а) та розрахункові (б) осцилограми напруги і струму якоря для ілюстрації достовірності моделі.

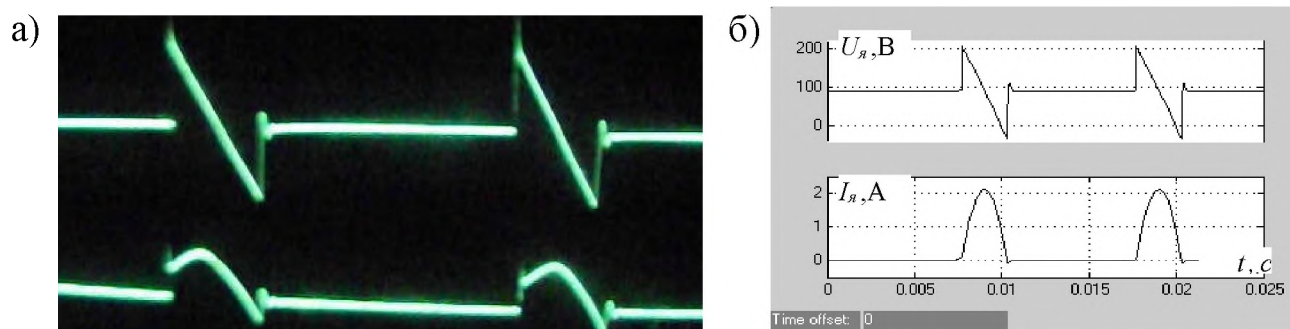


Рисунок 10 - Осцилограми напруги і струму якоря для однофазного випрямляча, отримані експериментально а) і на моделі б)

На рис. 11 показана модель електроприводу постійного струму з трифазним тиристорним випрямлячем.

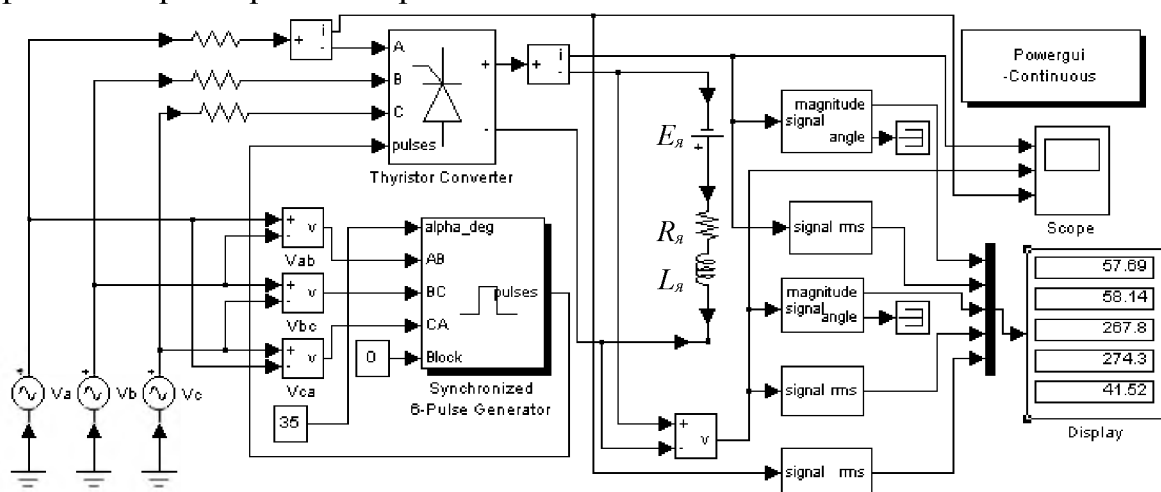


Рисунок 11- Імітаційна Matlab-модель електроприводу постійного струму з трифазним тиристорним випрямлячем

На рис. 12 показані отримані на моделі осцилограми напруги і струму якоря, які вказують на існування режимів безперервного та переривистого струмів.

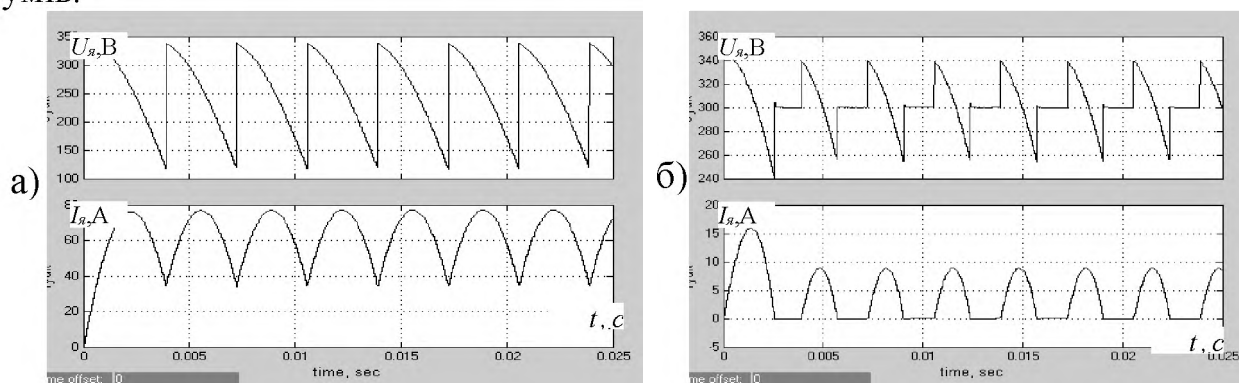


Рисунок 12 - Осцилограми напруги і струму якоря для трифазного випрямляча при безперервних (а) та переривистих (б) струмах

Методом повного факторного експерименту визначені аналітичні залежності коефіцієнтів реактивних напруги і струму, які, згідно методики, є функціями цілі. Для випадку однофазного тиристорного випрямляча аналітичні залежності мають вигляд:

$$K_{pi} = 0,988 + 0,005\alpha - 0,028T_{\gamma} - 0,048I_o^* + 0,025\alpha T_{\gamma} - 0,015\alpha I_o^* + 0,033T_{\gamma}I_o^* - 0,003\alpha T_{\gamma}I_o^*;$$

$$K_{pU} = 2,8 + 0,06\alpha^{2,5} + 236T_{\gamma}^{1,9} - 10I_o^2 - 3\alpha^{2,5}T_{\gamma}^{1,9} - 0,09\alpha^{2,5}I_o^2 - 80T_{\gamma}^{1,9}I_o^2 + 120\alpha^{2,5}T_{\gamma}^{1,9}I_o^2.$$

Для випадку трифазного випрямляча в режимі переривистих струмів:

$$K_{pi} = 0,985 + 0,062\alpha - 0,04T_{\gamma} - 0,183I_o^* - 0,04\alpha T_{\gamma} - 0,048\alpha I_o^* + 0,033T_{\gamma}I_o^* - 0,028\alpha T_{\gamma}I_o^*;$$

$$K_{pU} = 0,142 + 0,024\alpha + 0,012T_{\gamma} - 0,02I_o^* - 0,009\alpha T_{\gamma} - 0,002\alpha I_o^* + 0,009T_{\gamma}I_o^* + 0,012\alpha T_{\gamma}I_o^*.$$

Для трифазного випрямляча в режимі безперервних струмів:

$$K_{pi} = 0,141 + 0,025\alpha - 0,034T_{\gamma} - 0,05I_o^* - 0,009\alpha T_{\gamma} - 0,011\alpha I_o^* + 0,014T_{\gamma}I_o^* + 0,004\alpha T_{\gamma}I_o^*;$$

$$K_{pU} = 0,144 \cdot \alpha - 0,054.$$

Таким чином, запропонований метод визначення діючих значень реактивного струму і реактивної напруги тиристорних електроприводів постійного струму полягає у наступному: 1) визначаються абсолютні та відносні значення швидкості і постійної складової напруги; 2) для розрахованого відносного значення постійної складової напруги  $U_o^*$  визначаються кут керування тиристорів в радіанах для однофазного і трифазного випрямлячів  $\alpha_1 = (1,512 - U_o^*)/0,67$ ;  $\alpha_3 = (0,831 - U_o^*)/0,077$ ; 3) задаються абсолютним та відносним значенням постійної складової струму, які прямо пропорційні моменту навантаження на валу двигуна; 4) розраховуються числові значення коефіцієнтів реактивних напруги і струму та абсолютні значення змінних складових струму та напруги за формулами  $\sum I_k = K_{pi} \cdot I_o$ ;  $\sum U_k = K_{pU} \cdot U_o$ .

Для обмоток збудження двигунів постійного струму характерні високі значення індуктивності, які перевищують індуктивність обмотки якоря в 50-100 разів, тобто, якщо індуктивність обмотки якоря складає 0,002-0,005 Гн, то індуктивність обмотки збудження складає 0,2-0,5 Гн. Як показали дослідження на моделях, коефіцієнт пульсацій струму обмоток збудження при живленні від трифазних випрямлячів складає (2-7)% при струмах (1-30) А і тому немає сенсу окремо розраховувати реактивну потужність обмотки збудження.

У четвертому розділі отримані удосконалені співвідношення для визначення ємності конденсаторів для компенсації реактивної потужності електроприводів з ТПН. При синусоїдних режимах компенсація відбувається створенням режиму резонансу струмів, і ємність конденсаторів визначається через рівність реактивних опорів або реактивної потужності. Для електроприводів з ТПН пропонується визначати ємність конденсаторів через рівність реактивних енергій обмотки двигуна і конденсатора, які дорівнюють  $W_L = (L \sum I_k^2) / 2$ ;  $W_C = (C \sum U_k^2) / 2$ , де  $U_k, I_k$  - діючі значення гармонік струму і напруги. Тоді для компенсації реактивної потужності асинхронного електропривода з ТПН ємність фазних конденсаторів визначається формулою  $C = L \sum I_k^2 / \sum U_k^2 = 4\pi L_s [(0,675 + 0,1 \cdot \alpha) I_x]^2 / U_m^2 [12,032 - 3,832 \cdot \alpha - \sin(12,032 - 1,832 \cdot \alpha) + \sin 2\alpha]$ , де  $L_s = L_{so} + L_{s\sigma} = \sqrt{U_{\phi}^2 / I_{xc}^2 - R_s^2} / \omega$  - індуктивність обмотки статора;  $I_{xc}$  - діюче

значення струму при синусоїдному живленні;  $U_\phi$  - діюче значення фазної синусоїдної напруги. Перевірка режиму компенсації реактивної потужності асинхронного електропривода з ТПН для заданих кутів керування тиристорів проведена на моделі (рис.13).

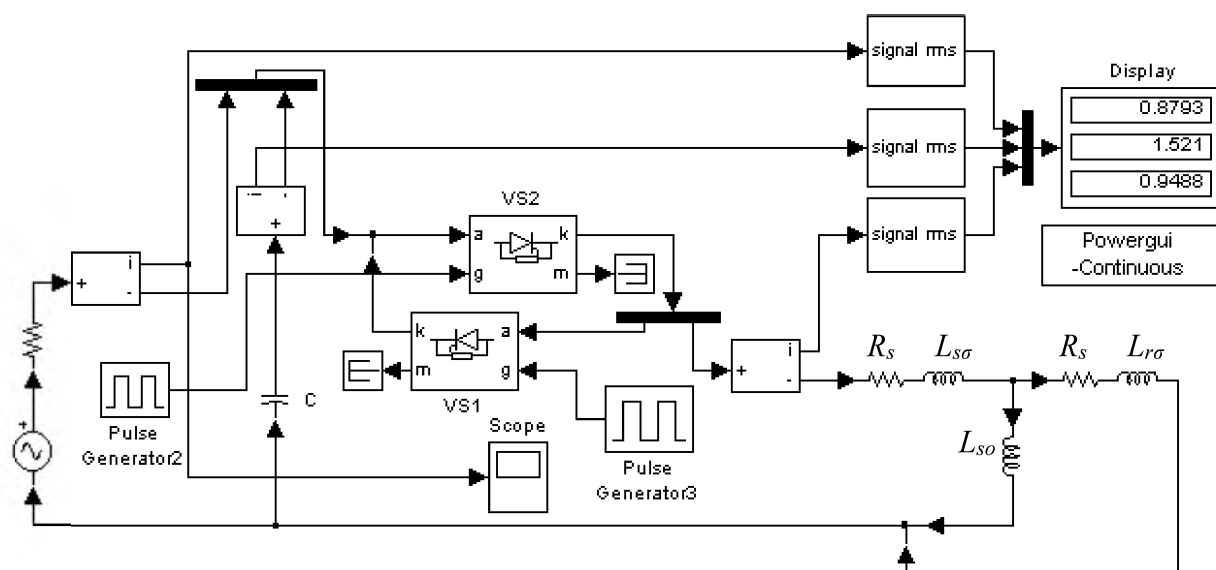


Рисунок 13 - Імітаційна Matlab-модель для перевірки режиму компенсації реактивної потужності асинхронного електропривода з ТПН

На рис. 14 показані отримані на моделі залежності споживаного з мережі струму при зміні ємності компенсуючих конденсаторів у більшу і меншу сторони від розрахункових значень. Таким чином, доведено, що розраховані значення ємностей забезпечують компенсацію реактивної потужності, оскільки струм мережі близький до мінімального. На рис. 15 показані розрахункові (а) і експериментальні (б) осцилограми споживаного з електромережі струму.

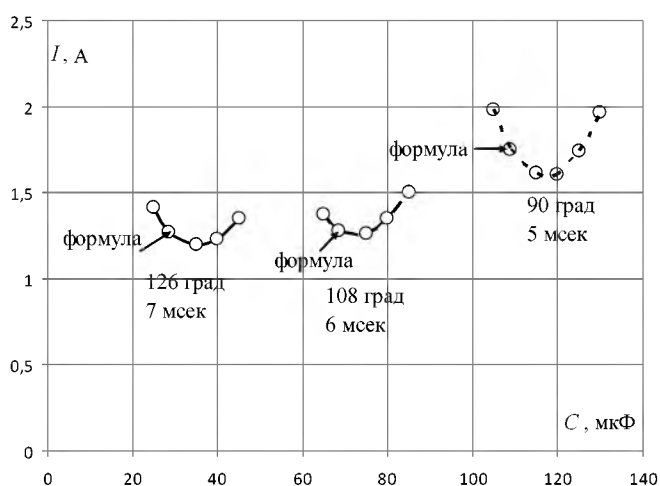


Рисунок 14 - Залежності діючого значення струму мережі від ємності конденсаторів

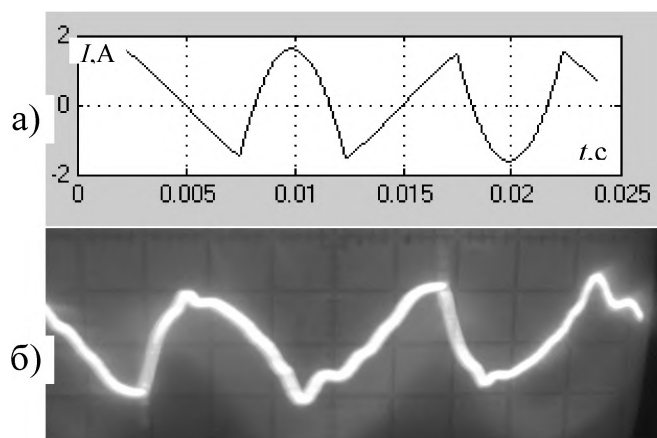


Рисунок 15 – Розрахункові (а) і експериментальні (б) осцилограми струму мережі в режимі компенсації

Ємності конденсаторів для компенсації реактивної потужності електроприводів постійного струму визначено за формулою  $C = L_{я} \sum I_{к}^2 / \sum U_{к}^2 = L_{я} (K_{PI} \cdot I_o)^2 / K_{PU} (I_o R_{я} + C \Phi \omega_{я})^2$ , де  $K_{PI}$ ,  $K_{PU}$  - коефіцієнти реактивних напруги і струму,  $I_o$  - постійна складова випрямленого струму навантаження,  $\omega_{я}$  - швидкість якоря. На рис. 16 показані результати перевірки на моделі режиму

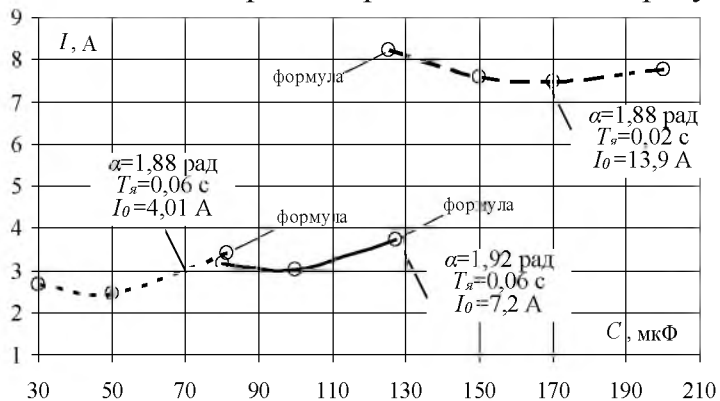


Рисунок 16 - Залежності струму мережі від ємності конденсаторів

компенсації реактивної потужності для однофазного тиристорного випрямляча. Розрахункові значення ємностей забезпечують компенсацію реактивної потужності, оскільки струм з мережі близький до мінімального. Для цього режиму на рис. 17

показані експериментальні (а) і розрахункові (б) осцилограми споживаного з електромережі струму.

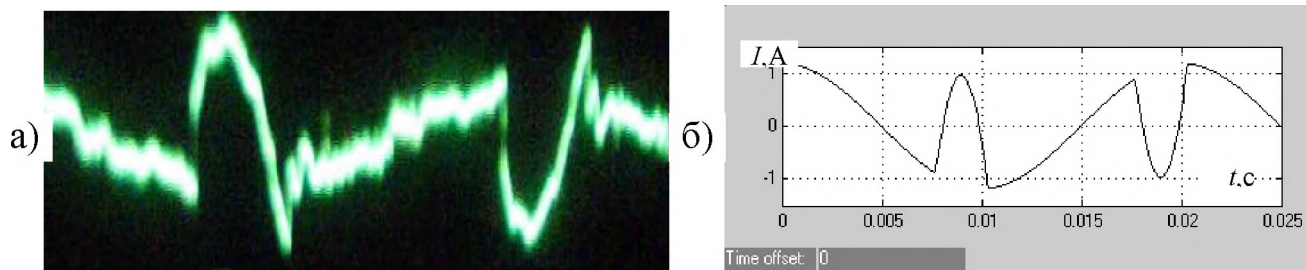


Рисунок 17 - Осцилограми струму з мережі, отримані експериментально (а) і на моделі (б) для однофазного тиристорного випрямляча

Результати перевірки режиму компенсації реактивної потужності електроприводу постійного струму з трифазним ТПН в режимі переривистих струмів наведені на рис. 18.

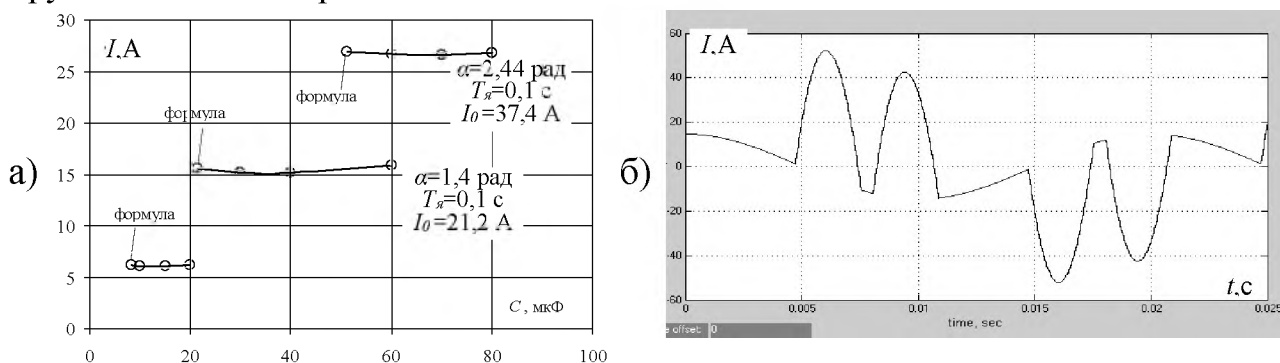


Рисунок 18 - Залежності струму мережі від ємності конденсаторів (а) та осцилограма струму мережі, отримана на імітаційній моделі (б)

Аналогічні графіки для режиму безперервних струмів показані на рис. 19.

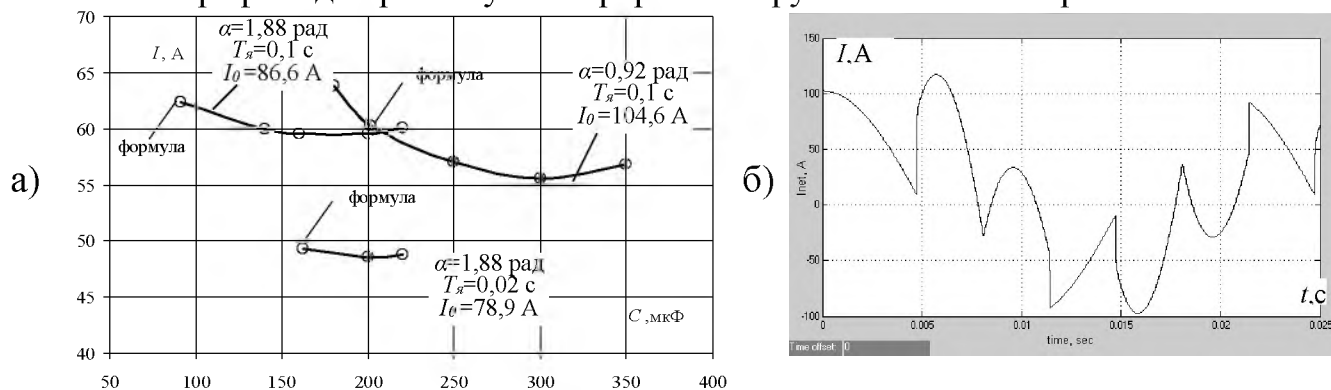


Рисунок 19 - Залежності струму мережі від ємності конденсаторів (а) та розрахункова осцилограма струму мережі (б)

Таким чином, проведені перевірки режиму компенсації на імітаційних моделях та результати натурних експериментів показали, що розрахункові значення ємностей конденсаторів компенсують реактивну потужність електроприводів с ТПН, суттєво зменшуючи споживання струму з мережі.

У п'ятому розділі удосконалено формулу для розрахунку коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна постійного струму при живленні від тиристорного випрямляча  $\eta_{ТП} = \eta_{ДПС} I_0^2 / (I_0^2 + \sum I_k^2)$ , де  $\eta_{ДПС}$  – номінальний ККД двигуна при живленні постійним струмом. На основі формули ККД введено поняття коефіцієнта  $K_B$  допустимого механічного навантаження на валу  $K_B = I_0^2 / (I_0^2 + \sum I_k^2)$ . На рис. 20 показані графіки залежності  $K_B$  від кута керування для одно- та трифазних випрямлячів, які апроксимовані формулами:

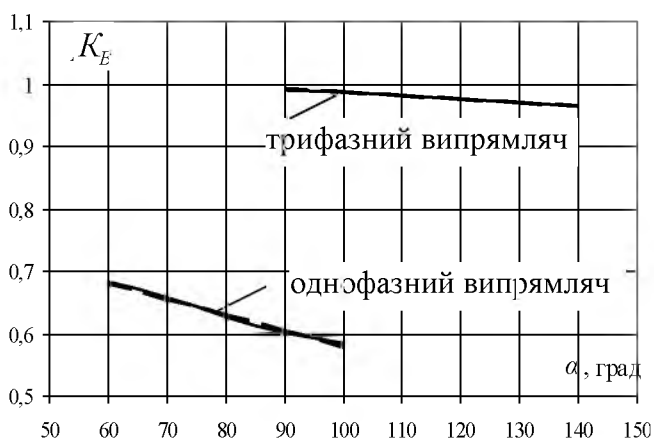


Рисунок 20 - Графік залежності коефіцієнтів допустимого механічного навантаження

$K_B = 0,832 - 0,0025\alpha$ ; для трифазного -  $K_B = 1,04 - 0,0005\alpha$ .

Удосконалено формулу для розрахунку ККД асинхронного двигуна при живленні від ТПН  $\eta_{АТЕП} = \eta_{АД} I_1^2 / (I_1^2 + \sum_{k=3}^{13} I_k^2)$ , де  $\eta_{АД}$  – ККД асинхронного двигуна при живленні синусоїдним струмом,  $I_{1s}, I_{ks}$  - діючі значення 1-ої та вищих гармонік струму статора. На основі формули ККД

уведено поняття коефіцієнта  $K_{АТЕП}$  допустимого механічного навантаження на валу  $K_{АТЕП} = I_1^2 / (I_1^2 + \sum_{k=3}^{13} I_k^2)$ . Таким

чином, при зменшенні напруги на статорі двигуна необхідно зменшувати його механічне навантаження. Для такого режиму найбільше підходять турбомеханізми з вентиляторною механічною характеристикою навантаження. Розроблена схема асинхронного електропривода з ТПН з автоматичною компенсацією реактивної потужності для водяного насоса.



У додатку представлені акти про використання результатів дисертаційної роботи в ДП "Науково-дослідницький інститут "ХЕМЗ", ТОВ "ПСК Енергобуд" і у навчальному процесі ХНУМГ імені О.М. Бекетова.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача підвищення енергоефективності електроприводів з ТПН, яке полягає у тому, що компенсація реактивної потужності дає можливість зменшити втрати електроенергії в електромережах.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. На основі аналізу теорій для визначення реактивної потужності електроприводів з ТПН обґрунтовано використання теорій Budeanu С. та Fryze S. Отримані рівняння балансу потужностей в комплексній формі для електроприводів з ТПН, які враховують теплову, механічну і реактивну складові потужностей, що дає змогу виділити останню в якості об'єкта дослідження.

2. Сформульовано поняття реактивного струму асинхронного електроприводу з ТПН та розроблено метод його визначення з урахуванням кута керування тиристорів, що дозволяє визначити потужність пристроїв для компенсації реактивної потужності.

3. Сформульовано поняття реактивного струму електроприводу постійного струму та розроблено метод його визначення з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої кола якоря, постійної складової випрямленого струму якоря і режиму струмів (переривистий або безперервний), що дозволяє визначити потужність компенсуючих пристроїв.

4. Отримані співвідношення для визначення ємностей конденсаторів для компенсації реактивної потужності в залежності від параметрів електроприводів з ТПН на основі рівності реактивних енергій. Розрахункові значення ємностей забезпечують режим компенсації, при цьому зменшуються втрати електроенергії в лініях електропередач та в трансформаторах підстанцій.

5. Удосконалені аналітичні співвідношення для визначення коефіцієнтів корисної дії двигунів асинхронного і постійного струму при живленні від ТПН з урахуванням режиму компенсації, що дозволяє перевірити вибрану потужність двигунів. Розроблена схема асинхронного електропривода з ТПН для водяного насоса з автоматичною компенсацією реактивної потужності.

6. Результати проведених у дисертації теоретичних досліджень передані в державне підприємство "НДІ "ХЕМЗ" та ТОВ "ПСК Енергобуд", а також використовуються у навчальному процесі ХНУМГ імені О.М. Бекетова.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ковальова Ю.В. Аналіз методів визначення реактивної потужності тиристорних електроприводів постійного струму в системах електропостачання / В.Г. Ягуп, Ю.В. Ковальова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ: ДДМА. - 2012. - №4(29). - С. 115-120.

*Здобувачем отримано рівняння балансу потужності з урахуванням реактивної складової потужності для двигуна постійного струму при живленні від тиристорного випрямляча.*

2. Ковальова Ю.В. Рівняння електроенергетичного балансу тиристорних електроприводів постійного та змінного струмів / Ю.В. Ковальова // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ. – 2012. - № 4. – С. 69-73.

3. Ковальова Ю.В. Про підвищення енергоефективності тиристорних електроприводів постійного струму / Ю.В. Ковальова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – Тематичний вип. 36 (1009). – С. 385-386.

4. Ковалева Ю.В. К вопросу повышения энергоэффективности асинхронных тиристорных электроприводов для турбомеханизмов / Ю.В. Ковалева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2014. - №2. - С.176-179.

5. Ковальова Ю.В. Визначення вхідного струму тиристорних збуджувачів / Ю.В. Ковальова // Комунальне господарство міст Серія: Технічні науки та архітектура. – Харків: ХНУМГ. - 2014. – Вип. 116. - С. 37-39.

6. Ковальова Ю.В. Реактивний струм асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги / Ю.В. Ковальова // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. - №6. - С. 43-46.

7. Ковальова Ю.В. Реактивна потужність електроприводів постійного струму з однофазними тиристорними випрямлячами / В.Г. Ягуп, Ю.В. Ковальова. // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНУМГ. – 2015. - № 1. – С. 18-21.

*Здобувачем проведене моделювання залежності реактивного струму від кута керування тиристорів та параметрів двигуна з наступною апроксимацією методом планування експерименту*

8. Ковальова Ю.В. Компенсація реактивної потужності тиристорних електроприводів постійного струму / Ю.В. Ковальова // Комунальне господарство міст; Серія: Технічні науки та архітектура. – Харків: ХНУМГ. - 2015. – вип. 121. - С. 83-85.

9. Тиристорний асинхронний електропривод з підвищеним коефіцієнтом потужності. Патент на корисну модель 98832 Україна, МПК H02P 7/00; заявник Ягуп Валерій Григорович, Ковальова Юлія Вікторівна; власник Харківський Національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. - № u2014 12279; заявл. 14.11.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. №9.

*Здобувачем запропонований RS-тригер з установкою заднім фронтом імпульсу, вхід S якого підключений до виходу формувача імпульсів напруги, а вхід R підключений до виходу формувача імпульсів струму.*

10. Ковальова Ю.В. Компенсація реактивної потужності тиристорних електроприводів постійного струму / Ю.В. Ковальова // Матеріали Міжнар. наук.- практ. конф. [«Новітні технології в електроенергетиці»], (Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 8-10 червня 2015 р.) / МОН України, НТУ «ХПІ» [та інші]. - Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – С. 75.

## АНОТАЦІЇ

**Ковальова Ю.В. Компенсація реактивної потужності електроприводів з тиристорними перетворювачами напруги.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" Харків, 2016.

Дисертація присвячена компенсації реактивної потужності асинхронних електроприводів та електроприводів постійного струму з тиристорними перетворювачами напруги (ТПН). Розроблені методи для визначення діючого значення реактивного струму асинхронного електропривода з ТПН та електроприводів постійного струму з однофазним та трифазним ТПН з урахуванням кута керування тиристорів. Отримані співвідношення для визначення ємності компенсуючих конденсаторів для заданого кута керування тиристорів, які враховують: для асинхронних електроприводів з ТПН – діюче значення реактивної складової струму холостого ходу; для електроприводів постійного струму з ТПН – діюче значення змінної складової випрямленого струму кола якоря. Удосконалені співвідношення для визначення коефіцієнтів корисної дії двигунів при живленні від ТПН, які враховують: для асинхронних – відношення квадратів діючого значення першої гармоніки струму до діючого значення струму статора; для електроприводів постійного струму – відношення квадратів постійної складової випрямленого струму якоря до діючого значення.

*Ключові слова:* електродвигун асинхронний, електродвигун постійного струму, тиристорний перетворювач, компенсація реактивної потужності, імітаційне моделювання

**Ковалева Ю.В. Компенсация реактивной мощности электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи компенсации реактивной мощности электроприводов: асинхронных и постоянного тока с тиристорными преобразователями напряжения (ТПН). Получены в комплексной форме записи уравнения электроэнергетического баланса мощности электроприводов с ТПН для теоретического обоснования потребления реактивной мощности. В левой части уравнений содержится полная мощность, в правой части – мощность нагрева обмоток, механическая мощность на валу и реактивная мощность. Реактивный ток асинхронного электропривода с ТПН представляет собой действующее значение реактивной составляющей тока холостого хода статора, величина которого зависит от угла управления тиристорами. Реактивный ток электропривода постоянного тока с ТПН – действующее значение переменной составляющей выпрямленного тока цепи якоря. Для определения аналитической зависимости реактивного тока от угла

управления тиристором и параметров электроприводов использовались имитационные модели в программном пакете Matlab. Для выделения реактивной составляющей из тока холостого хода статора асинхронного электропривода с ТПН использовался обратный диод, включенный параллельно Т-образной схеме замещения двигателя. Для определения аналитической зависимости действующего значения переменной составляющей тока якоря от угла управления тиристором, электромагнитной постоянной времени и тока нагрузки использовался метод планирования эксперимента. Разработаны методы для расчета реактивных составляющих тока электроприводов с ТПН и аналитические выражения для расчета емкости конденсаторов. Расчетные значения емкостей конденсаторов в полной мере обеспечивают режим компенсации реактивной мощности, что подтверждено моделированием и натурными экспериментами. Усовершенствованы соотношения для расчета коэффициента полезного действия двигателей при питании от ТПН. При этом для асинхронных электроприводов учитывается отношение квадратов первой гармоники тока холостого хода статора к его действующему значению; для электроприводов постоянного тока – отношение квадратов постоянной составляющей выпрямленного тока якоря к его действующему значению.

*Ключевые слова:* электродвигатель асинхронный, электродвигатель постоянного тока, тиристорный преобразователь, компенсация реактивной мощности, имитационное моделирование

**Kovaleva J.V. The compensation of reactive power for electric drive with thyristor transformers of voltage.** – As manuscript.

The dissertation for the degree of technical sciences candidate, speciality 05.09.03 – electrical complexes and systems. – NTU “KPI”. – Kharkiv, 2016.

Dissertation is devoted to compensation reactive power of AC and DC motors with the thyristor voltage convertors. Reactive power produce the losses of the electrical energy on the transmission lines and substation transformers. The methods for determine effective value reactive current stator AC motor and effective value reactive current armature circle DC motor with thyristor voltage convertors are developed. Reactive current of stator AC motor and reactive current of armature circle DC motor as function control angle with the thyristor are derived with the computer models. The results of computer simulation were approximated with known methods and analytical formulas are developed. The correlations for determination of capacity compensating condensers for the set control angle with the thyristors are obtained. They take into account: for AC motor – effective value of reactive component of stator current; for DC motor – effective value of variable component of the rectified current of armature circle. The formulas for the calculation of capacity condensers for compensation reactive power of the thyristor electric drive are based on equality effective value nonsine energy of the magnetic field of the motor winding and energy of the electric field of condenser. The efficiency factor are determined for AC and DC motors.

*Keywords:* AC and DC motors, thyristor convertor, reactive power compensation, simulation model

Відповідальний за випуск  
к.т.н., професор кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем НТУ «ХП»  
Кутовий Ю.М.

Підписано до друку 12.03.2016 р. Формат 60x90/16.  
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.  
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9  
Наклад 100 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»  
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16  
ЄДРПОУ 3125131 від 19.12.2000 р.