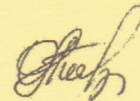


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

БУТОВА ОЛЬГА АНАТОЛІВНА



УДК 621.314.26

**БАГАТОПУЛЬСНІ ПАРАЛЕЛЬНІ КОМПЕНСОВАНІ
КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ З ПОЛІПШЕНИМИ
ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Сокол Євген Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
проректор з науково-педагогічної роботи

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Новський Володимир Олександрович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України,
провідний науковий співробітник


кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Олександр Федорович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
докторант кафедри промислової електроніки

Захист відбудеться «16» квітня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «12» березня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час використання електроенергії постійного струму продовжує відігравати суттєву роль в ряді галузей промисловості. В приводі постійного струму і електротехнологічних установках малої і середньої потужності часто використовуються шестипульсні керовані випрямлячі (КВ).

Враховуючи сучасні вимоги до якості електричної енергії в системах електропостачання для шестипульсних схем випрямлення існує два напрямки модернізації:

1. Заміна таких перетворювачів сучасними перетворювальними системами.
2. Використання додаткових схем і схемних рішень, що дозволяють істотно підвищити енергетичні показники діючих шестипульсних випрямлячів.

Якщо перший напрямок вимагає практично повного переоснащення обладнання, що веде до відповідного збільшення вартості, то розвиток другого напрямку можливий за рахунок підвищення пульсності КВ або шляхом використання декількох мостових схем, або зміною законів керування ними.

Комплексний підхід до створення вдосконалених схем потужних випрямлячів та їх систем керування дозволяє одночасно вирішити декілька завдань: поліпшити енергетичні показники системи (коефіцієнт потужності, к.к.д.); зменшити уміст вищих гармонік у вхідному струмі перетворювача; поліпшити масогабаритні показники перетворювачів.

Незважаючи на ускладнення силового устаткування і складність побудови систем керування, перспективним є використання перетворювачів на основі компенсованих керованих випрямлячів (ККВ). ККВ реалізуються шляхом послідовного або паралельного з'єднання мостових схем з природною і штучною комутаціями силових ключів. Паралельне підключення до існуючого КВ додаткового повністю керованого випрямляча, наприклад, на GTO-тиристорах, дає можливість модифікації вже існуючих шестипульсних перетворювачів і створення на їх основі ККВ. Використання таких силових схем з одночасним застосуванням нових алгоритмів керування дозволяє одночасно підвищити коефіцієнт потужності КВ і знизити коефіцієнт несинусоїдальності.

Таким чином, створення і детальне дослідження паралельних схем ККВ, ефективних з точки зору енергетичних показників і електромагнітної сумісності з мережею; розробка критеріїв вибору параметрів силових схем ККВ та алгоритмів керування ними, є актуальною науково-практичною задачею, яка визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з тематикою науково-дослідних робіт кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» відповідно до завдань держбюджетної теми МОН України «Розробка та дослідження компенсованих керованих випрямлячів» (ДР № 0103U007473), в якій здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – поліпшення енергетичних показників багатопульсних паралельних компенсованих керованих випрямлячів

за рахунок паралельного з'єднання вентиляльних мостів з природною і штучною комутаціями силових ключів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- уточнення методу розрахунку зрівняльних струмів багатопульсних паралельних ККВ;
- дослідження впливу напруги на конденсаторі силового активного фільтру (САФ), що використовується для виведення комутаційної енергії КВ на ГТО-тиристорах, на комутаційні процеси в схемі;
- визначення факторів, що впливають на вибір напруги на конденсаторі САФ, що використовується для виведення комутаційної енергії;
- отримання залежностей для визначення миттєвих значень випрямленої напруги в багатопульсних паралельних ККВ;
- розробка принципів побудови системи керування багатопульсними паралельними ККВ з урахуванням особливостей комутаційних процесів в них;
- розробка комп'ютерних моделей багатопульсних паралельних ККВ для перевірки отриманих теоретичних висновків.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси та енергетичні показники багатопульсних паралельних компенсованих керованих випрямлячів.

Предмет дослідження – багатопульсні паралельні компенсовані керовані випрямлячі з поліпшеними енергетичними показниками.

Методи дослідження. При рішенні поставлених задач використовувалися: теорія електричних кіл, системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів; метод гармонічного аналізу (розкладання в ряд Фур'є) для визначення величин гармонік струму мережі. Основним інструментарієм при моделюванні та розробці схем паралельних ККВ були: пакети комп'ютерних програм - Matlab, Mahtcad, FlowCode, Proteus.

Наукова новизна отриманих результатів:

- дістав подальшого розвитку метод розрахунку зрівняльних струмів багатопульсних КВ, що надало можливість розрахувати параметри індуктивностей зрівняльних реакторів для основних варіантів схем паралельних ККВ;
- розширено та науково обґрунтовано поняття «комутація керованих випрямлячів на ГТО-тиристорах», як інтервал часу переходу струму фази трансформатора, що виходить з роботи, в фазу, яка вступає в роботу. Це відмінно від існуючого, як інтервал часу переходу струму з одного вентиля, що проводить, на наступний без переривання струму;
- дістала подальшого розвитку теорія електромагнітних процесів в КВ на ГТО-тиристорах, що полягає в урахуванні зміни кіл протікання комутаційного струму в залежності від напруги на конденсаторі САФ, що використовується для виведення комутаційної енергії. Це дало можливість дослідити вплив та обґрунтувати критерії вибору напруги на конденсаторі САФ;
- вперше отримано залежності для визначення миттєвих значень випрямленої напруги в паралельному ККВ з однією вентиляльною обмоткою трансформатора, які дозволили отримати криві випрямленої напруги, дослідити процеси комутації струму та встановити шляхи поліпшення енергетичних показників.

Практичне значення отриманих результатів для силової електроніки полягає в наступному:

- створені схеми на основі ККВ, що мають поліпшені енергетичні показники відносно 6-пульсного КВ, застосування яких можливе в різних областях промисловості;

- дано критерії вибору напруги на конденсаторі САФ, що може бути використано при проектуванні ККВ і САФ;

- визначені принципи побудови системи керування паралельних ККВ та розроблена функціональна схема ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора, що включає в себе підсистеми роздільного керування мостами, які не тільки забезпечують вирівнювання струмів вентиляльних мостів, а також покращують основні енергетичні показники схеми: отримання коефіцієнту потужності більше ніж 0,95, коефіцієнту зсуву не менш ніж 0,994 та зменшення коефіцієнта THD ;

- створені Matlab-моделі багатопульсних паралельних ККВ, які дозволяють провести імітаційне моделювання запропонованих схем для практичної перевірки запропонованих теоретичних положень.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені на виробництві в Науково-виробничому підприємстві «ЕОС» (м. Харків), ДП «НДІ ХЕМЗ» (м. Харків) та у навчальному процесі на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП» при підготовці лабораторного практикуму для студентів зі спеціальності 7.05080202 – «Електронні системи» по двом дисциплінам.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розрахункові співвідношення для визначення зрівняльних струмів паралельних схем ККВ; дослідження електромагнітних процесів КВ на GTO-тиристорах для різних режимів роботи; аналіз величин зрівняльного струму та випрямленої напруги паралельної схеми ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора без комутації та з урахуванням комутації; розрахункові формули для визначення величин гармонік струму мережі ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора; розробка загальної структури системи керування паралельними схемами ККВ; методика створення комп'ютерних моделей паралельних схем ККВ і побудова самих моделей.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 2000, 2001, 2002, 2004, 2009, 2012 рр.; м. Одеса, 2014 р.); Міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2002 р.); міжнародному симпозиумі «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology II» (PÄRNU, 2013 р) та семінарах «Силова та біомедична електроніка» наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (м. Харків, 2003, 2009, 2010, 2012, 2014 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 13 наукових публікаціях, з них 11 статей у наукових фахових виданнях України (1 - у виданні,

включеному до міжнародних наукометричних баз), 1 стаття - у матеріалах закордонного міжнародного симпозіуму.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 171 сторінка; з них 55 рисунків по тексту та 11 рисунків на 8 сторінках; 3 таблиці на 2 сторінках; список використаних джерел з 133 найменувань на 15 сторінках; 3 додатка на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показана наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, приведені дані про їхню апробацію, публікацію і впровадження.

Перший розділ присвячений аналізу основних тенденцій вдосконалення напівпровідникових перетворювачів змінної напруги на постійну. Визначено, що істотним недоліком 6-пульсних перетворювачів є генерація гармонічних складових вищого порядку, що крім зниження коефіцієнта потужності, негативно позначається на обладнанні, яке споживає енергію від тієї ж мережі, а спотворення форми струму мережі не відповідають міжнародним стандартам. На основі аналізу запропоновано комплексний підхід до заходів з поліпшення енергетичних характеристик та властивостей мережі живлення потужних 6-пульсних випрямлячів: збільшення пульсності силових схем КВ, активна фільтрація вищих гармонік мережі та нові алгоритми керування перетворювальних систем на базі КВ.

Показано, що застосування традиційного методу збільшення пульсності вихідної напруги (до 12, 18 і більше) шляхом послідовного або паралельного з'єднання напівкерованих вентильних мостів дозволяє лише поліпшити гармонічний склад вищих гармонік в кривій струму мережі. Поліпшення енергетичних показників можливо шляхом застосування штучної та природної комутації вентилів в багатопульсних компенсованих керованих випрямлячах.

ККВ являє собою керований випрямляч з двома включеними послідовно або паралельно вентильними мостами, один з яких виконується на повністю керованих GTO-тиристорах, які працюють з негативними, випереджаючими точку природного включення, кутами керування. Вентильна група іншого моста виконується на одноопераційних ключах і працює з позитивними кутами керування, відстаючими від точки природного включення. У схемі ККВ для виведення енергії, що накопичена в індуктивностях розсіювання обмотки трансформатора, використовується діодний міст і САФ з конденсатором на вході.

Застосовувані закони керування в ККВ засновані на оптимізації керування в умовах мінливих робочих характеристик об'єкта керування і параметрів мережі живлення.

На основі аналізу наукових і практичних розробок у галузі підвищення енергетичних показників 6-пульсного КВ і поліпшення його електромагнітної суміс-

ності, зроблено висновок, що перспективним напрямком є паралельне або послідовне з'єднання його з КВ на силових повністю керованих вентилях (типів GTO, IGCT або IGBT), тобто створення багатофункціональних перетворювальних систем на основі ККВ. Додаткового дослідження вимагають паралельні схеми ККВ.

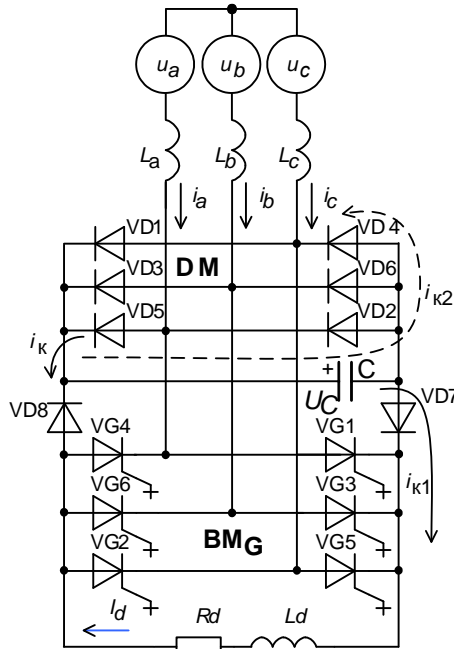


Рисунок 1 – КВ на GTO-тиристорах

ний міст DM (VD1-VD6) і конденсатор С (рис. 1). Енергія, що накопичена в індуктивності розсіювання, передається спочатку в конденсатор С, заряджаючи його, а потім може бути повернута назад в мережу за допомогою САФ (ланцюги САФ на рис. 1 не показані).

На основі еквівалентної схеми контуру комутації (рис. 2), з урахуванням зміни струмів у фазах a і b (інтервал часу $\Delta t = t_k - t$ на рис. 3), отримано співвідношення для визначення інтервалу комутації струму двох фаз Δt . Кут комутації GTO-тиристорів γ_G , що відповідає інтервалу часу Δt , пропорційний значенню індуктивності розсіювання L_s , струму навантаження I_d і залежить від напруги на конденсаторі С і напруги фаз a і b (кута керування α)

Другий розділ присвячений дослідженню схем паралельних ККВ та КВ на GTO-тиристорах (рис. 1), що входить до складу ККВ. При оцінці електромагнітних процесів в КВ на GTO-тиристорах встановлено що, вимикання одного ключа призводить до негайного припинення протікання струму в ньому, тобто класична комутація відсутня. При цьому протікання струму в індуктивності розсіювання негайно припинитися не може. Комутацією в такому випадку слід вважати інтервал часу переходу струму з фази, що виходить з роботи, в фазу, що вступає в роботу.

Для виведення енергії, що накопичена в індуктивності розсіювання обмотки трансформатора фази, що виключається в якості снаберу, використовуються діод-

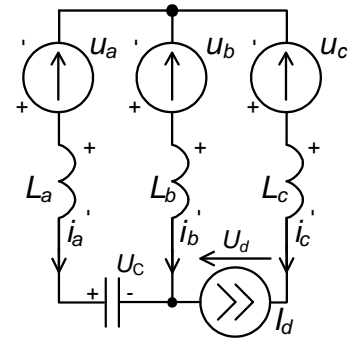


Рисунок 2 – Еквівалентна схема контуру комутації

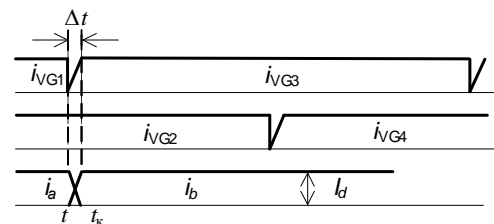


Рисунок 3 – Струми в схемі

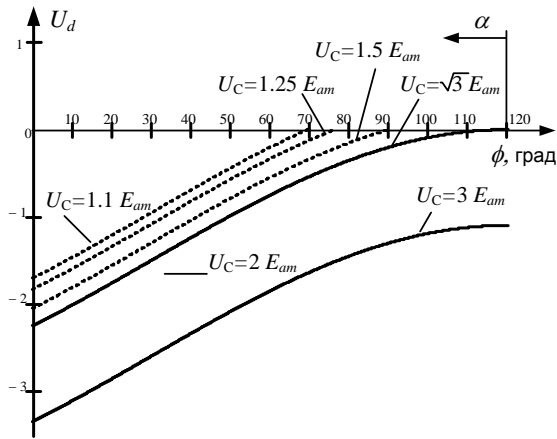


Рисунок 4 – Залежності U_d на інтервалі комутації при різних U_C

$$\gamma_G = \frac{2L_S I_d \omega}{U_C - u_a + u_b}.$$

Встановлено режими роботи схеми, межі яких визначаються напругою на конденсаторі С:

1. Якщо напруга на конденсаторі $U_C < E_{am}$ (відносна напруга $U_C^* < 1$), де E_{am} - амплітуда лінійної напруги, то діодний міст ДМ працює у режимі випрямлення і конденсатор С заряджається від джерела живлення до $U_C = E_{am}$ ($U_C^* = 1$).

2. При $E_{am} < U_C < \sqrt{3}E_{am}$ на інтервалі комутації через діоди моста ДМ протікає додатковий струм $i_{\kappa 2}$ (рис. 1), який не передає енергію в навантаження (напруга на навантаженні буде дорівнювати нулю), але збільшує втрати в елементах схеми.

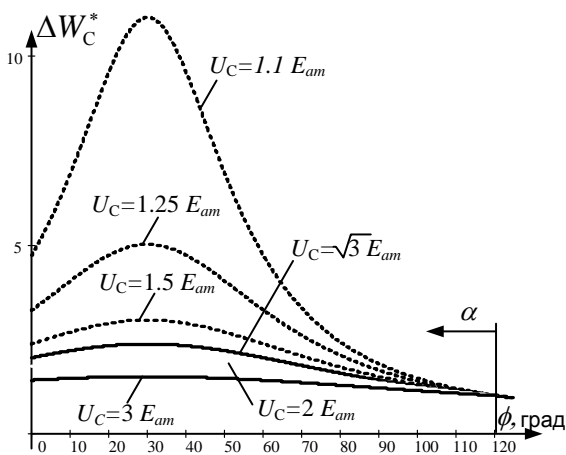


Рисунок 5 – Залежність $\Delta W_c^* = f(\alpha)$ при різних U_C

3. При $U_C > \sqrt{3}E_{am}$ через діоди моста ДМ не протікатиме додатковий струм, а випрямлена напруга на інтервалі комутації визначається згідно співвідношенню

$$U_d = \frac{u_b + u_a - u_c}{2} - \frac{U_C}{2}.$$

Залежності U_d на інтервалі комутації при різних U_C наведені на рис. 4.

Енергетичний баланс в схемі на інтервалі комутації з урахуванням приросту енергій в індуктивностях розсіювання фаз, енергії джерел напруги, конденсатора, навантаження описується наступним чином:

$$\Delta W_a + \Delta W_b + \Delta W_c + \Delta W_{L_a} + \Delta W_{L_b} + \Delta W_{L_c} + \Delta W_C + \Delta W_d = 0.$$

Істотна нелінійність отриманої залежності енергії, що виводиться з системи на інтервалі комутації, від кута управління α пов'язана з близькістю значень напруги конденсатора С і напруг фаз мережі живлення, що може ускладнювати роботу САФ (рис. 5),

$$\Delta W_C = \frac{L_S I_d^2 U_C}{U_C - u_a + u_b}.$$

Використовуючи метод розрахунку зрівняльних реакторів для мостових перетворювачів, отримано розрахункові співвідношення для визначення амплітуд зрівняльних струмів в некомпенсованому 12-пульсному та чотирьох схемах компенсованих КВ (рис. 6).

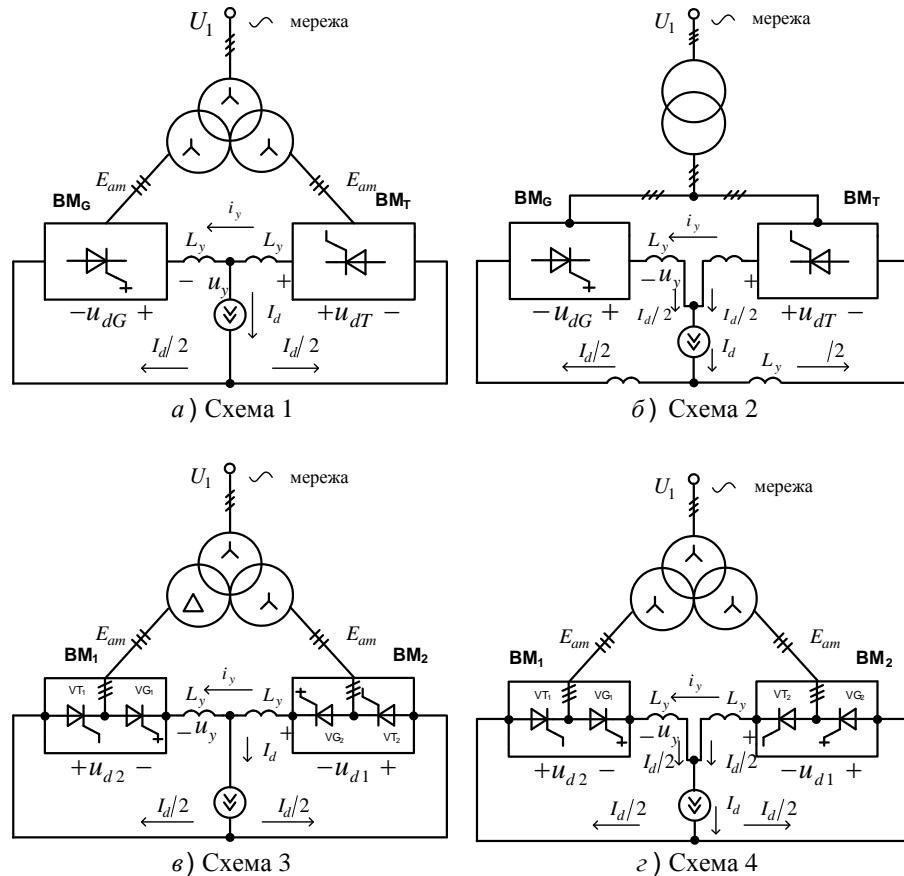


Рисунок 6 – Схеми паралельних багатопульсних ККВ

Залежність відносних значень амплітуд зрівняльного струму ККВ від кута керування КВ α при миттєвої комутації струму симетрична відносно прямої, паралельної осі ординат і проходить через точку $\alpha = \pi/2$ (рис. 7). На основі порівняння особливостей побудови вентиляльних груп, що є складовими мостів ККВ, значень встановленої потужності зрівнювальних реакторів та перетворювального трансформатора та їх впливу на енергетичні показники перетворювача зроблено висновок: найбільш оптимальним схемотехнічним рішенням для модифікації існуючих мостових КВ є схема паралельного ККВ з однією вентиляльною обмоткою перетворювального трансформатора (рис. 6, схема 2), функціональна схема якої представлена на рис. 8.

Результати аналізу електромагнітних процесів в схемі ККВ у всьому діапазоні зміни кута керування і відповідні їм еквівалентні схеми дозволили визначити накладення інтервалів комутацій одноопераційних та ГТО-тиристорів при значеннях кута керування $\alpha = \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6$. Отримано уточнені криві зрівняльної та випрямної напруги при різних кутах керування α з урахуванням

комутацій вентилів для шести характерних діапазонів кута керування: 1) $0 < \alpha < \pi/6$; 2) $\pi/6 < \alpha < \pi/3$; 3) $\pi/3 < \alpha < \pi/2$; 4) $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$; 5) $2\pi/3 < \alpha < 5\pi/6$; 6) $5\pi/6 < \alpha < \pi$. Визначено, що комутація вентилів не впливає на максимальну амплітуду змінної складової зрівняльного струму.

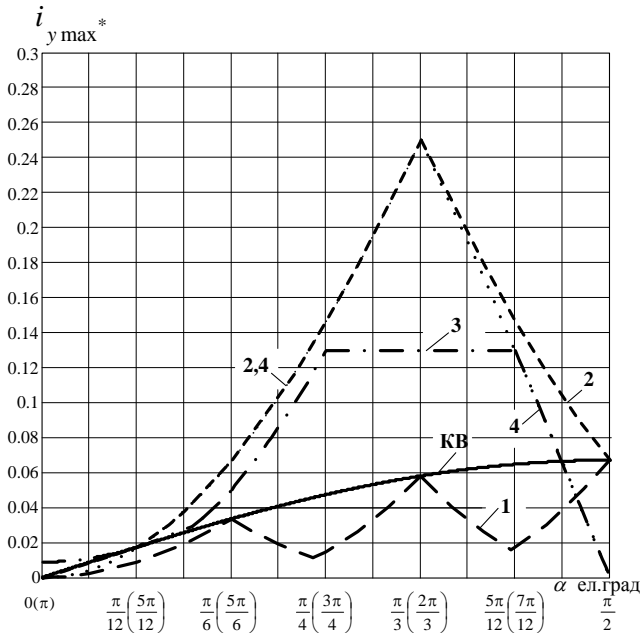


Рисунок 7 – Залежність $i_{y,max}^* = f(\alpha)$, де КВ - 12-пульсний КВ; ККВ (рис. 6): 1 – схема 1; 2 – схема 2; 3 – схема 3; 4 – схема 4

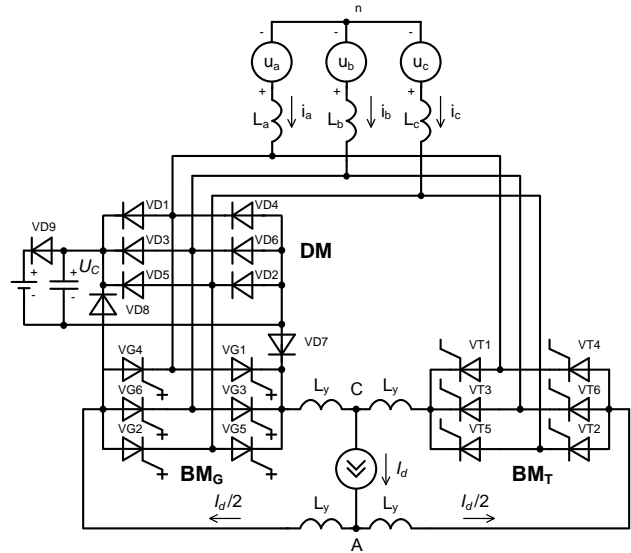


Рисунок 8 – Функціональна схема ККВ з однією вентильною обмоткою перетворювального трансформатора

Третій розділ присвячений порівнянню енергетичних показників і характеристик схеми ККВ з однією вентильною обмоткою перетворювального трансформатора по відношенню до 6-пульсного КВ, а також розробці принципів побудови системи керування паралельними схемами ККВ.

Завдання вдосконалення енергетичних показників та мінімізації масогабаритних показників КВ безпосередньо зводяться до визначення складових повної потужності та зниження внеску її неактивних складових. Миттєві значення мережеских струмів ККВ визначаються шляхом підсумовування гармонічних складових для двох складових струмів, які створюються кожним з мостів. У дисертаційній роботі показано, що косінусна складова струму мережі КВ на ГТО-тиристорах на відміну від синусної, змінює знак по відношенню до 6-пульсної мостової схеми на одноопераційних тиристорах, що відповідає протилежному напрямку потоку реактивної потужності.

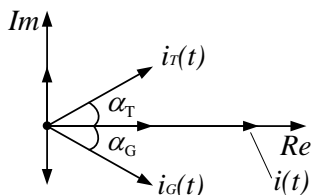


Рисунок 9 – Векторна діаграма складових гармонік струму мережі

Доведено, що активні складові гармонік струму мережі підсумовуються, а реактивні - знаходяться в протифазі і компенсуються при будь-якому куті керування (рис. 9).

На підставі розкладання струму мережі в

ряд Фур'є для двох мостових випрямлячів, що входять у ККВ, побудовані криві струму мережі i_a ККВ при різних кутах керування α при допущенні миттєвої комутації силових ключів. Форма струму мережі при кутах керування $\alpha = 0$ та $\alpha = \pi/3$ повторює струм 6-пульсного КВ, в діапазонах $0 < \alpha < \pi/6$ и $\pi/6 < \alpha < \pi/3$ струм мережі близький до струму 12-пульсної системи (рис. 10).

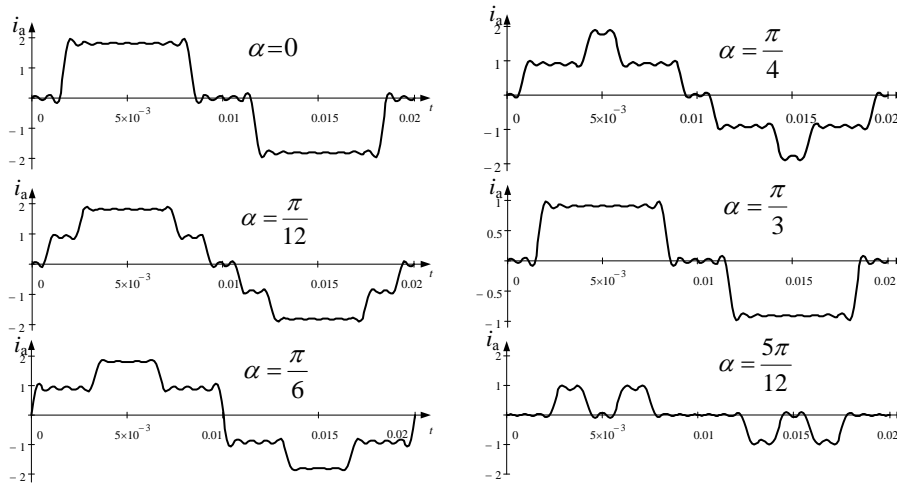


Рисунок 10 – Струм мережі ККВ з однією вентиляною обмоткою перетворювального трансформатора

Аналіз зміни коефіцієнта гармонічних спотворень THD (Total Harmonic Distorsions) залежно від кута керування показав значне його збільшення в діапазоні кутів більше ніж $\alpha = 60^\circ$, з чого випливає необхідність обмеження діапазону регулювання при виборі в якості критерію мінімізацію THD (рис. 11). ККВ має такий же гармонічний склад струму мережі (5, 7, 11, 13, 17... гармоніки) як і 6-пульсний КВ, але, як видно з графіків рис. 12, за певних кутів керування спостерігаються мінімуми значень вищих гармонік струму порівняно з 6-пульсним КВ, наприклад, в діапазоні $15 \leq \alpha < 30$ зменшення 5-й та 11-й гармонік можливо від 20% до 90%, при куті керування $\alpha = 15^\circ$ відбувається зменшення THD на 50%. Даний характер змін може бути використаний для зменшення впливу ККВ на мережу живлення.

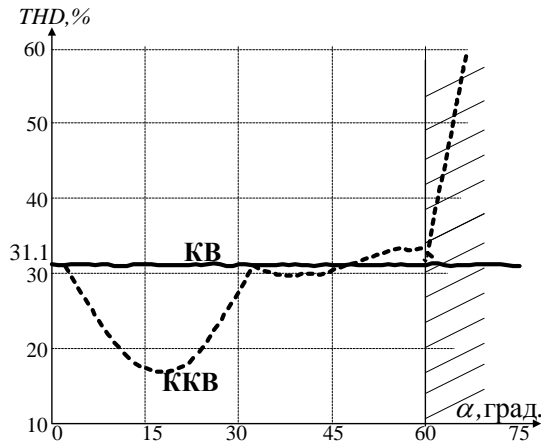


Рисунок 11 – Залежність $THD = f(\alpha)$

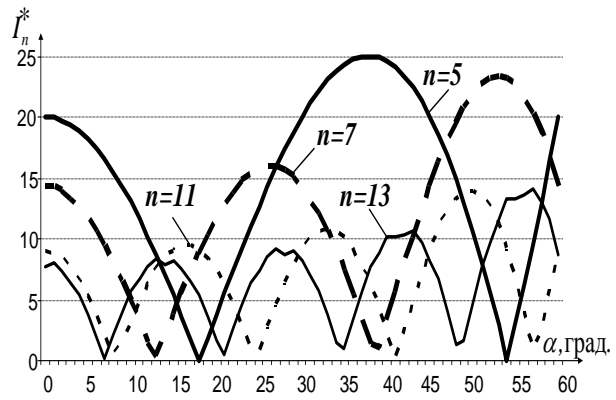


Рисунок 12 – Залежність $I_n^* = f(\alpha)$

Сумарні втрати активної потужності на основній частоті з урахуванням впливу вищих гармонік визначаються втратами активної потужності в трансформаторі від першої гармоніки та додатковими – зумовленими струмами вищих гармонік. Спостерігається зниження втрат активної потужності в трансформаторі від першої гармоніки мережевого струму в ККВ майже на 30% порівняно з 6-пульсним КВ (рис. 13).

Вплив вищих гармонік струму на втрати в трансформаторі живлення враховується коефіцієнтом «К-фактор», тобто коефіцієнтом збільшення втрат в трансформаторі за рахунок несинусоїдальності струму. Встановлено, що втрати від вихрових струмів в трансформаторі живлення ККВ менше на 10% в порівнянні з 6-пульсним КВ, і визначаються гармонічним складом вхідного струму (рис. 11) через значення $K(\alpha)$

$$K(\alpha) = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1(\alpha)}{I(\alpha)} \right)^2 \sum_{n=1}^N \left[\left((6n-1)^q \left(\frac{I(6n-1, \alpha)}{I_1(\alpha)} \right)^2 + \right) \right] \right] \left[\left((6n+1)^q \left(\frac{I(6n+1, \alpha)}{I_1(\alpha)} \right)^2 \right) \right]$$

де $(6n \pm 1)$ – номер гармоніки ($n=1,2,3,\dots$); $I_1(\alpha)$ – струм першої гармоніки; $I(\alpha)$ – струм мережі; q – експоненціальна константа, що залежить від типу обмоток і частоти ($q=1,7$).

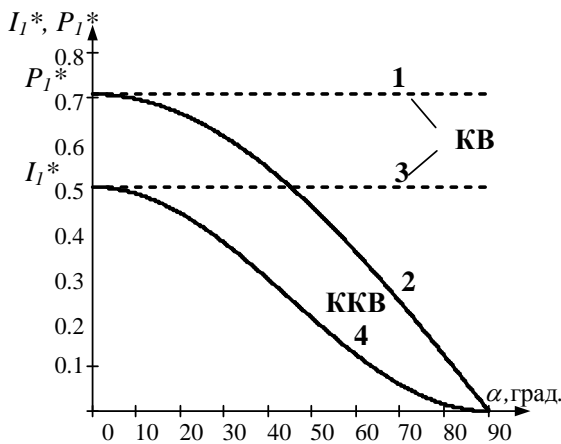


Рисунок 13 – Залежності

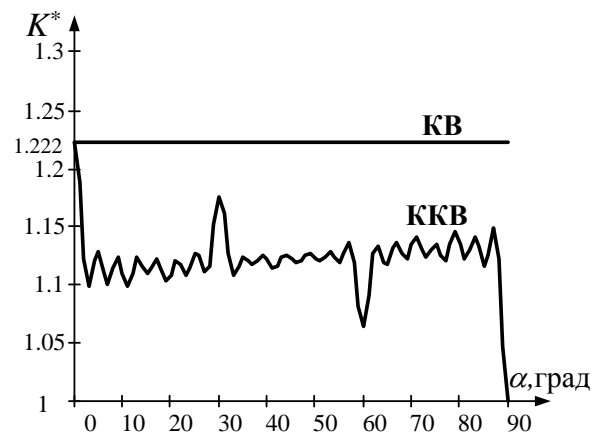


Рисунок 14 – Залежність $K = f(I_d)$

$$I^*(\alpha) = f(\alpha), P^*(\alpha) = f(\alpha)$$

У дисертаційній роботі запропоновано узагальнену функціональну схему системи керування паралельними ККВ (рис. 15). Це дозволяє вирішити основні завдання: підтримка одиничного коефіцієнта зсуву основної гармоніки струму мережі щодо напруги мережі, отримання близького до одиниці коефіцієнта потужності, вирівнювання струмів мостових схем ККВ, придушення вищих гармонік струму мережі, підтримка заданого струму (напруги) навантаження. Залежно від топології силової частини ККВ (типу трансформатору та вентиляльних груп) та параметру регулювання можлива зміна узагальненої функціональної схеми ККВ.

В результаті імітаційного моделювання ККВ з однією вентиляльною обмоткою перетворювального трансформатора виявлена особливість, а саме те, що при симетричному керуванні мостовими схемами ККВ (рівність по модулю кутів керування $\alpha_G = \alpha_T$) повна компенсація реактивної потужності можлива тільки при миттєвій комутації силових ключів.

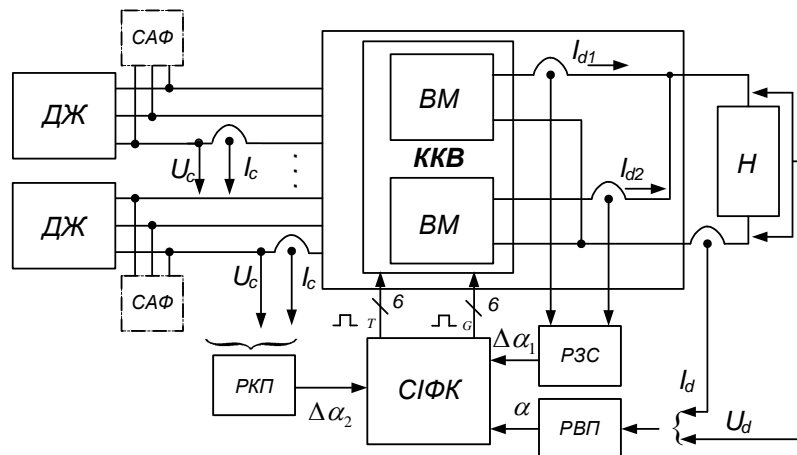


Рисунок 15 – Узагальнена функціональна схема системи керування паралельних ККВ: ДЖ – джерело живлення, ВМ – вентиляльний міст, РВП – регулятор вихідних параметрів, РКП – регулятор коефіцієнту потужності, РЗС – регулятор зрівняльних струмів, САФ – силовий активний фільтр, СІФК – система імпульсно-фазового керування, Н – навантаження

При врахуванні комутації силових ключів проявляється неспівпадіння зовнішніх та регульованих характеристик випрямлячів, що призводить до появи розбалансу струмів випрямлячів в режимі симетричного керування. Для виконання одного із завдань системи керування – вирівнювання струмів в мостових схемах ККВ, повинно виконуватися рівність середніх значень випрямленої напруги мостів.

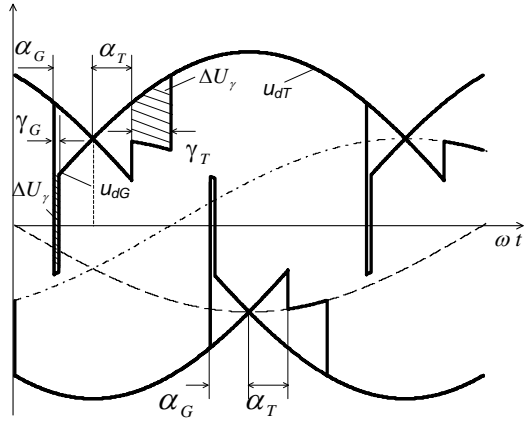


Рисунок 16 – Криві випрямлених напруг мостових схем ККВ мережі

Оскільки вольт-секундні майданчики ΔU_γ на інтервалі комутації, що визначаються величиною індуктивного падіння випрямленої напруги, різні, то рівність напруг, а отже і струмів залежать тільки від комутаційних процесів у кожному з випрямлячів (рис. 16):

$$I_{d1}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma G}^*}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*}; \quad I_{d2}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma T}^*}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*}.$$

Для рівного розподілу струму між паралельно працюючими випрямлячами під час перехідного процесу, тобто рівності струмів $I_{d1}^* = I_{d2}^* = I_d^*/2$, комутаційні па-

діння напруги повинні бути рівні $\Delta U_{\gamma T}^* = \Delta U_{\gamma G}^*$, що неможливо забезпечити при симетричному законі керування. Для забезпечення рівності струмів мостів I_{d1} та I_{d2} розроблена система роздільного керування струмами випрямлячів. Її функціональна схема представлена на рис. 17, а.

При роздільному керуванні сумарний струм навантаження формується в результаті завдання струму кожного моста в регуляторах зрівняльних струмів (РЗС1, РЗС2) на рівні половини номінального струму. При цьому кут керування вентильного моста на одноопераційних та ГТО-тиристорах формується незалежно як пропорційно-інтегральна функція помилки між $I_d/2$ і поточним значенням струму відповідного моста. На векторній діаграмі (рис. 17, б) показано, що при підтримці рівності струмів мостів ККВ можливе отримання мінімального фазового зсуву вектора основної гармоніки сумарного струму $I_{1\Sigma}$ та фазної напруги U_1 .

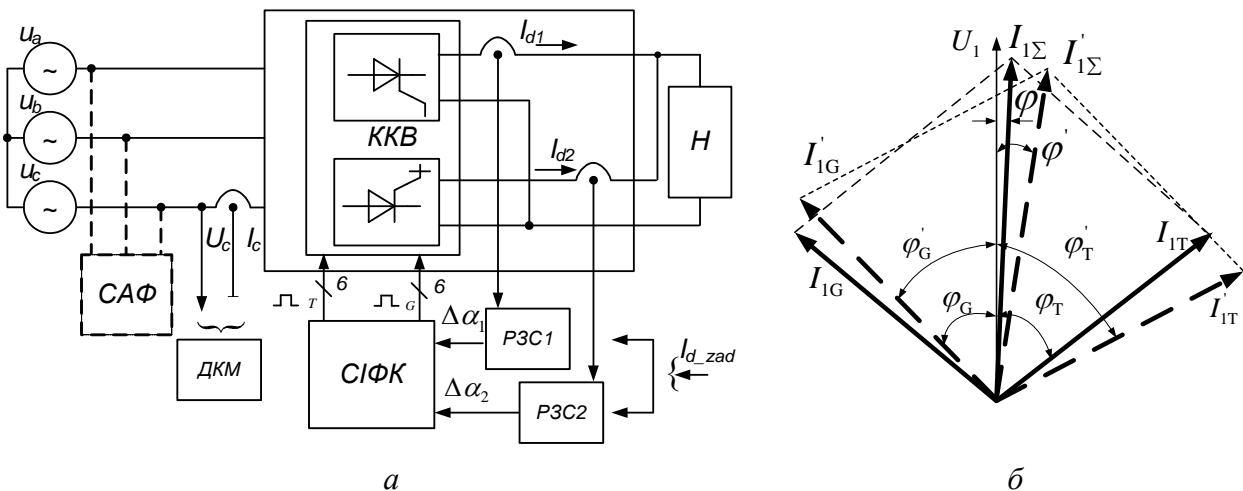


Рисунок 17 – Система роздільного керування струмами випрямлячів: а) функціональна схема; б) векторна діаграма

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці теоретичних висновків та розрахунків. Визначено особливості імітаційного моделювання напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Структурне моделювання перетворювача дозволяє підтвердити теоретичні положення і, в першому наближенні, технічну ефективність запропонованого рішення. Ідеї та алгоритми, закладені в схемотехніку і систему керування (СК) паралельних схем ККВ, на першому етапі відпрацьовані в пакеті комп'ютерного імітаційного моделювання Matlab. Налаштування алгоритмів керування з різним ступенем деталізації, аж до врахування особливостей конкретного мікроконтролера в цифрових системах керування, проводилося за допомогою візуальних засобів програмування (Matlab, FlowCode, Proteus), що дозволило отримати достатньо інформації для формування вимог до реалізації СК.

Розроблена Matlab-модель схеми дванадцятипульсного паралельного ККВ, що складається з двох 6-пульсних мостів (рис. 6, схема 3), побудованих на змішаних вентильних групах, для перевірки методу розрахунку зрівняльних струмів (рис. 18, а).

Аналіз отриманих осцилограм та експериментальних залежностей підтверджує коректність теоретичних висновків, отриманих в дисертаційній роботі. Кінцеві кути комутації і пульсації струму навантаження призводять до деякого збільшення амплітуди зрівняльних струмів, однак це збільшення не перевищує 10% і для інженерних розрахунків прийнятні теоретичні криві (рис. 18, б).

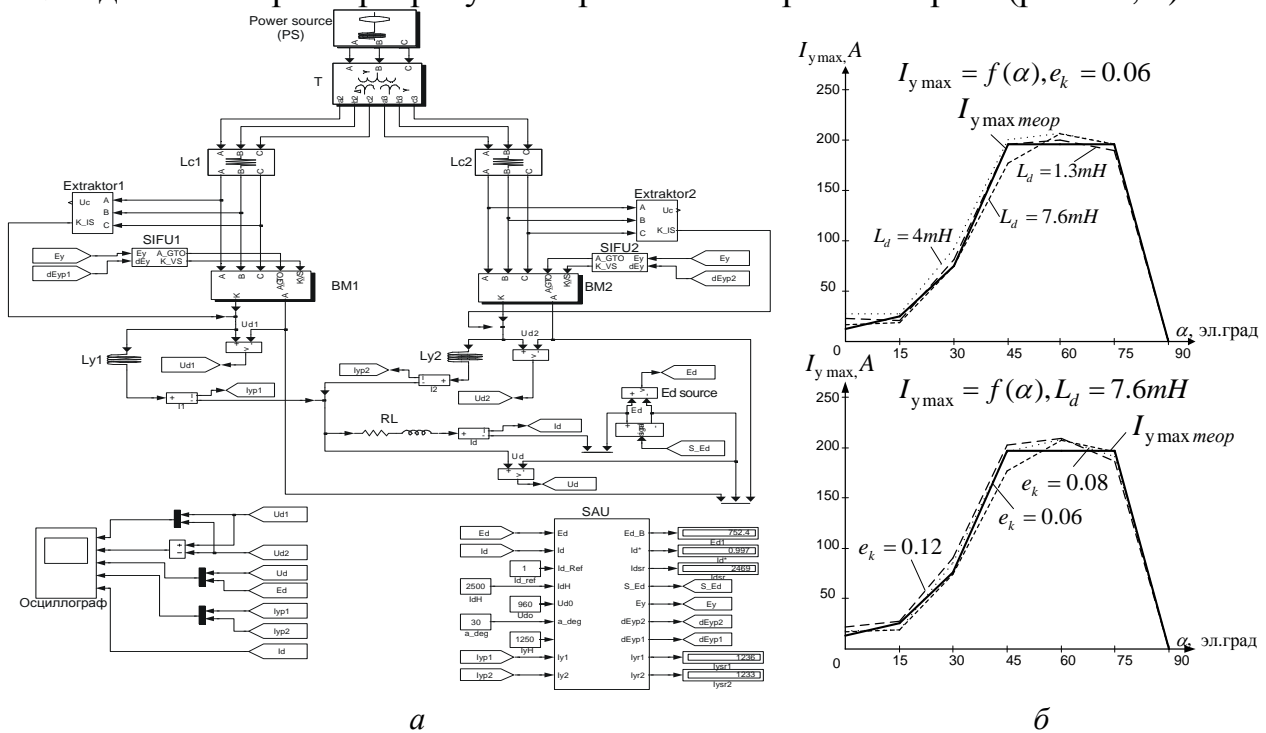


Рисунок 18 – Схема 12-типульсного паралельного ККВ:
 а) Matlab-модель; б) експериментальні та теоретичні криві

Дослідження електромагнітних процесів та енергетичних показників 6-пульсного КВ та паралельного ККВ з однією вентильною обмоткою перетворювального трансформатора, що працюють від силового трансформатора ТМП-

2500/10У2 номінальною потужністю 2,5 MW на активно-індуктивне навантаження, проводилися на розробленій комп'ютерній Matlab-моделі схеми ККВ, що наведена на рис. 19.

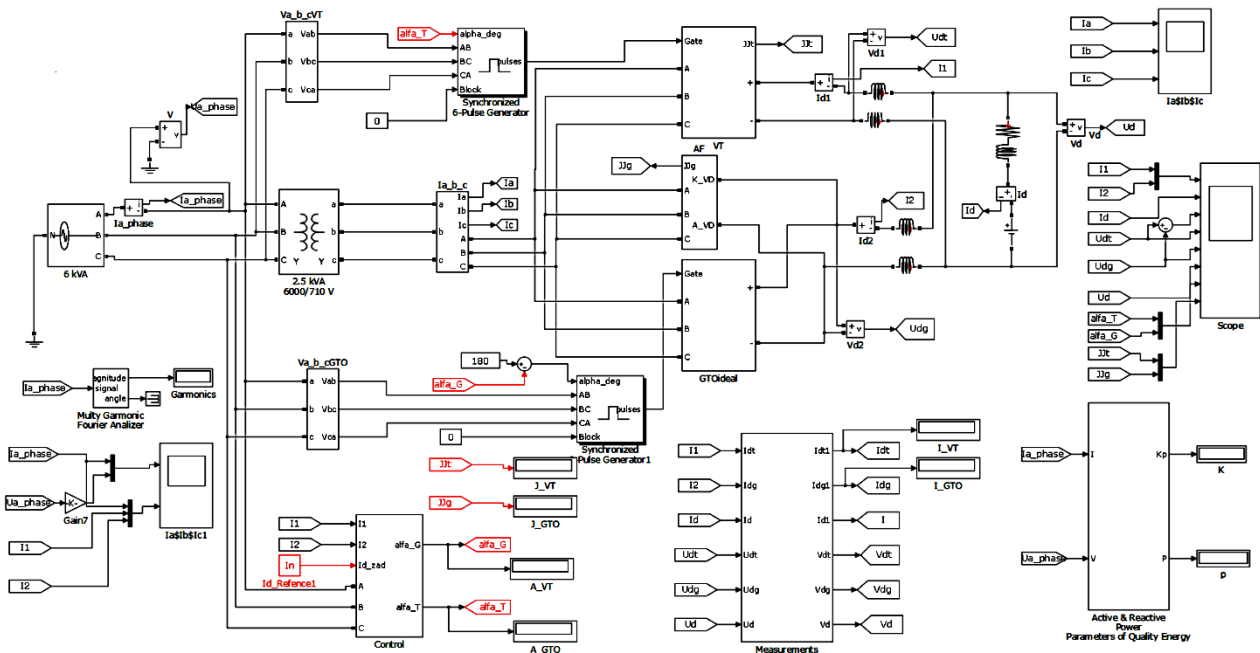


Рисунок 19 – Matlab-модель схеми ККВ з однією вентиляльною обмоткою перетворювального трансформатора

Дослідження Matlab-моделі показало збіг теоретичних кривих напруг мостів та зрівняльного напруги ККВ, побудованих з використанням комп'ютерної програми Mathcad, та експериментальних кривих з урахуванням та без урахування комутації силових ключів (рис. 20).

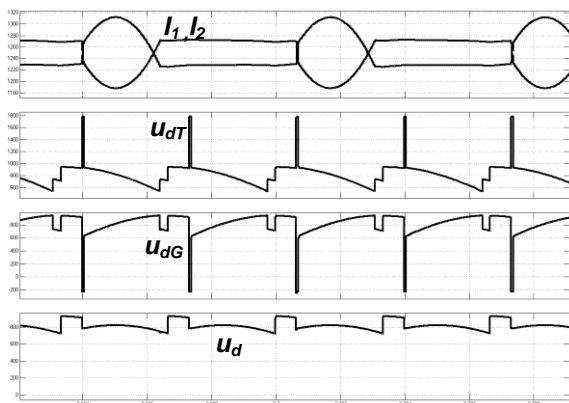


Рисунок 20 – Часові діаграми, отримані на Matlab-моделі схеми ККВ при роздільному керуванні

Моделювання показало, що запропонована система роздільного керування дозволяє забезпечити рівність струмів випрямлячів при різних напругах на конденсаторі С (рис. 21). При цьому кути у керування α_G та α_T істотно різні у всьому діапазоні регулювання струму від 0,7 до 1,0 I_{dn} ($I_{dn} = 2500 A$).

Коефіцієнт зсуву K_3 досліджуваної схеми ККВ має значення близьке до одиниці (0,995-0,997) у всьому діапазоні регулювання струму навантаження (рис. 22), в той час коефіцієнт зсуву K_3 окремих мостових схем пропорційний

косинусу кута керування. Якщо за критерій оптимізації обирати коефіцієнт потужності K_{II} , можливе обмеження діапазону регулювання струму навантаження від 0,8 до 1,0 I_{dn} , при якому маємо високий коефіцієнту потужності K_{II}

(більш ніж 0,95) при близькому до одиниці коефіцієнті зсуву K_3 , що свідчить про незначний коефіцієнт спотворень вхідного струму.

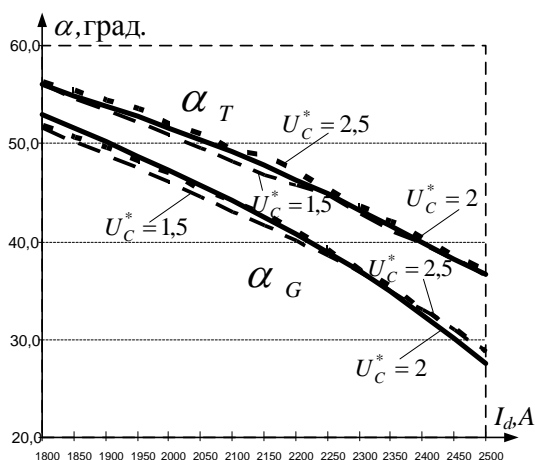


Рисунок 21 – Залежність $\alpha = f(I_d)$

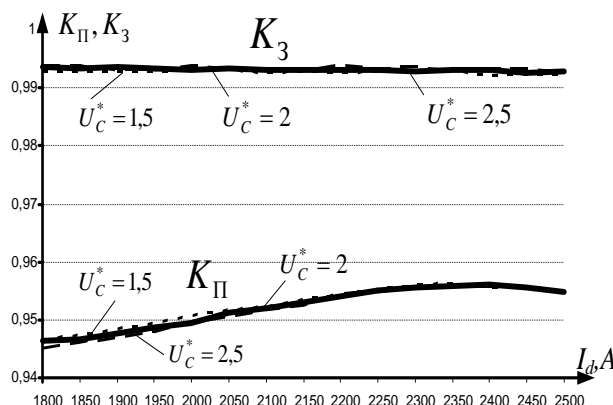


Рисунок 22 – Залежність $K = f(I_d)$

Приведені часові діаграми свідчать, що струм мережі збігається по фазі з напругою при $I_d = 2500 A$ та аналогічний раніше розрахованому (рис. 23).

У додатках наведено алгоритми керування та лістингі програм, акти впровадження на виробництві в Науково-виробничому підприємстві «ЕОС» (м. Харків), ДП «НДІ ХЕМЗ» (м. Харків) та в навчальний процес кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП».

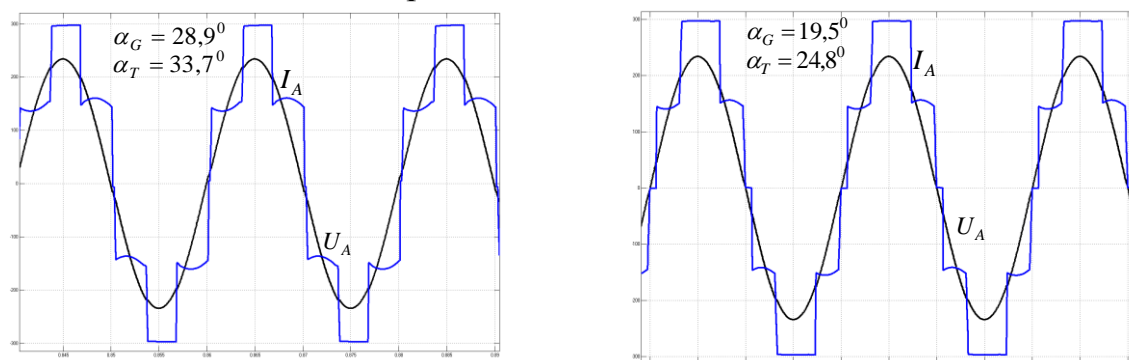


Рисунок 23 – Часові діаграми струму мережі та напруги

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу поліпшення енергетичних показників 6-пульсних КВ шляхом створення на їх основі багатопульсних паралельних компенсованих керованих випрямлячів.

1. Уточнено метод розрахунку зрівняльних струмів багатопульсних паралельних ККВ з урахуванням комутаційних процесів, який показав, що індуктивності зрівняльних реакторів можна обирати без урахування комутації вважаючи, що величина зрівняльного струму не перевищує 7-10 % від номінального струму ККВ.

2. Розширено поняття «комутація керованих випрямлячів на ГТО-тиристорах». Визначено, що факторами вибору напруги на конденсаторі САФ є:

режим роботи, діапазон регулювання та техніко-економічні показники КВ. Встановлено, що існує три діапазони: 1) $U_C < E_{am}$, який є неробочим та в сталому режимі приводить до $U_C = E_{am}$; 2) $E_{am} < U_C \leq \sqrt{3}E_{am}$, при якому існують додаткові контури протікання струмів САФ та КВ, та який може використовуватись лише в обмеженому діапазоні зміни напруги навантаження U_d ; 3) $U_C > \sqrt{3}E_{am}$, при якому комутаційна енергія використовується лише для відновлення енергії ємності конденсатора САФ, та який є допустимим на всьому діапазоні зміни U_d .

3. На основі аналізу кривих зрівняльного струму та випрямленої напруги ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора та з урахуванням комутації, отримано вирази для комутаційних функцій та миттєвих значень випрямленої напруги для всього діапазону зміни кута α .

4. Виявлено наявність взаємовпливу мостів. Аналіз залежностей для визначення миттєвих значень випрямленої напруги в паралельному ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора показав, що цей взаємовплив проявляється тільки у випрямлених напругах кожного з мостів, але не впливає на характер напруги на навантаженні.

5. На підставі результатів, отриманих при зрівняльному аналізі гармонічного складу струмів мережі для 6-пульсного КВ та ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора, зроблено висновок про поліпшення форми струму мережі. Встановлено, що відносні втрати в трансформаторі від першої гармоніки струму мережі в ККВ на 30% менш ніж у 6-пульсному КВ, а втрати від вихрових струмів в трансформаторі живлення ККВ - на 10%, і визначаються гармонічним складом вхідного струму.

6. Розроблено принципи побудови системи керування паралельними багатопульсними ККВ та на їх основі функціональну схему системи роздільного керування токами паралельного ККВ з однією вентиляною обмоткою трансформатора, що враховує особливості комутаційних процесів схеми.

7. Показано, що модернізація існуючих 6-пульсних КВ шляхом створення паралельної сполуки з КВ на ГТО-тиристорах дозволяє одержати енергетичні показники схеми такі як, отримання коефіцієнту потужності більше ніж 0,95 та коефіцієнту зсуву не менш ніж 0,994. Зіставлення результатів моделювання на створених моделях 6-пульсного та багатопульсних паралельних ККВ з результатами теоретичних висновків та розрахунків, показало їх практичний збіг в межах 93 відсотків.

8. Результати проведених у дисертації теоретичних досліджень і практичних розробок знайшли застосування на НВП «ЕОС», ДП «НДІ ХЕМЗ», а також використано у навчальному процесі кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бутова О. А. Matlab-модель 12-ти пульсного паралельного КУВ с разделенным управлением / Е. И. Сокол, О. А. Бутова, М. А. Шишкин // Энергоз-

береження. Енергетика. Енергоаудит. – Харків: ТОВ «Північно-східна енергетична компанія «СВЕКО». – 2014. – Т. 2, № 9 (128). – С. 101-106.

Здобувачу належить розробка функціональної схеми системи з роздільним керуванням токами паралельного ККВ.

2. Бутова О. А. Уравнительные токи в двенадцатипульсных схемах управляемых выпрямителей / О. А. Бутова, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. – вип. 15. – С. 231-244.

Здобувачу належить уточнення методики визначення величин зрівняльних струмів ККВ з урахуванням комутаційних процесів.

3. Бутова О. А. Расчет уравнительных токов в двенадцатипульсных параллельных компенсированных управляемых выпрямителях / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, О. А. Бутова // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2002. – Ч. 5, тематичний вип. – С. 43-48.

Здобувачу належить одержання розрахункових формул величин зрівняльних струмів ККВ.

4. Бутова О. А. Компьютерное моделирование двенадцатипульсного параллельного компенсированного управляемого выпрямителя / Г. Г. Жемеров, О. А. Бутова // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2003. – Ч. 1, тематичний вип. – С. 79-84.

Здобувачем створено модель ККВ, а також виконано її тестування і налагодження.

5. Выпрямленное напряжение компенсированного управляемого выпрямителя по двенадцатипульсной параллельной схеме с общей вентиляющей обмоткой преобразовательного трансформатора / Г. Г. Жемеров, О. А. Бутова, Н. А. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2004. – Ч. 2, тематичний вип. – С. 3-8.

Здобувачу належить одержання розрахункових формул випрямленої напруги ККВ у повному діапазоні зміни кута керування.

6. Бутова О. А. Исследование процессов двенадцатипульсного параллельного компенсированного управляемого выпрямителя / О. А. Бутова, Г. Г. Жемеров, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 2, тематичний вип. – С. 3-10.

Здобувачу належить уточнення розрахункових формул для знаходження величин випрямленої напруги ККВ з урахуванням напруги на конденсаторі.

7. Применение искусственного интеллекта в системах управления преобразователями электрической энергии / А. Е. Иванов, В. В. Замаруев, О. А. Бутова, А. В. Ересько // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 4, тематичний вип. – С. 29-32.

Здобувачем зроблена оцінка практичної реалізованості засобу відновлення форми лінійної напруги з використанням мікропроцесора.

8. Бутова О. А. Анализ принципов построения систем управления многопульсными выпрямителями / О. А. Бутова // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2009. – Ч. 5, тематичний вип. – С. 59-65.

9. Бутова О. А. Особенности применения пакета MATLAB/SIMPOWERSYSTEMS для моделирования устройств силовой электроники / О. А. Бутова, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – Ч. 2, тематичний вип. – С. 247-251.

Здобувачу належить методика створення комп'ютерної моделі ККВ і побудова самої моделі ККВ.

10. Улучшение энергетических показателей систем постоянного тока с 6-пульсными управляемыми выпрямителями / О. А. Бутова, В. В. Замаруев, В. А. Макаров, М. А. Шишкин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – Ч. 2, тематичний вип. – С. 83-87.

Здобувачу належить визначення гармонійних складових мережевого струму ККВ, одержання розрахункових формул і побудова кривих мережевого струму ККВ.

11. Бутова О. А. Графические средства разработки и моделирования алгоритмов управления на основе микроконтроллеров / О. А. Бутова, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2011. – Ч. 2, тематичний вип. – С. 327-332.

Здобувачу належить розробка алгоритму формування від'ємних кутів керування для ГТО-тиристорів засобами графічного програмування.

12. Бутова О. А. Особенности работы управляемого выпрямителя на ГТО-тиристорах / О. А. Бутова, Е. И. Сокол, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2012. – Ч. 4, тематичний вип. – С. 5-10.

Здобувачу належить уточнення формул і співвідношень для визначення випрямленої напруги на інтервалі комутації в КВ на ГТО-тиристорах, а також визначення режимів роботи схеми, межі яких визначаються напругою на конденсаторі.

13. Butova Olga. Features the Control of 12-Pulse Compensated Controlled Rectifier / Olga Butova // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering. Doctoral School of Energy and Geotechnology II: 13th International Symposium, (PÄRNU, 14-19 January 2013). – PÄRNU: TUT. – P. 219-222.

АНОТАЦІЇ

Бутова О.А. Багатопульсні паралельні компенсовані керовані випрямлячі з поліпшеними енергетичними показниками. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена поліпшенню енергетичних показників та дослідженню електромагнітних процесів в багатопульсних паралельних компенсованих керованих випрямлячах.

Сформульовані основні шляхи підвищення енергетичних показників 6-пульсних керованих випрямлячів. Показано, що підвищення енергетичних показників 6-пульсних КВ може бути досягнуто за рахунок схемотехнічних рішень,

тобто послідовного або паралельного включення з мостами на повністю керованих тиристорах, і систем активної фільтрації з впровадженням алгоритмів керування, що реалізовано в ККВ.

Розширено поняття «комутація» для повністю керованих ключів. Отримано закономірності при виборі параметрів силової схеми КВ на ГТО-тиристорах.

Розширено застосування методу розрахунку зрівняльних реакторів для схем паралельних ККВ з урахуванням комутаційних процесів в схемах, показано можливість застосування методу без урахування комутації. Зроблено аналіз кривих миттєвих значень випрямленої напруги та отримано розрахункові формули і криві для визначення мережевих струмів паралельного ККВ з однією вентиляльною обмоткою трансформатора.

Запропоновано функціональну схему керування паралельними ККВ, що враховує особливості побудови силових частин багатопульсних паралельних ККВ і застосування різноманітних параметрів як критеріїв керування. Запропоновано систему роздільного керування струмами випрямлячів паралельного ККВ з однією вентиляльною обмоткою трансформатора. Комп'ютерне моделювання підтвердило теоретичні висновки і довело можливість практичної реалізації паралельних схем ККВ з покращеними енергетичними показниками.

Ключові слова: випрямляч керований компенсований, енергетичні показники якості електроенергії, комутація, силовий активний фільтр, коефіцієнт потужності.

Бутова О.А. Многопульсные параллельные компенсированные управляемые выпрямители с улучшенными энергетическими показателями. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена улучшению энергетических показателей и исследованию электромагнитных процессов многопульсных параллельных компенсированных управляемых выпрямителей.

Сформулированы основные пути повышения энергетических показателей шестипульсных УВ. Показано, что повышение энергетических показателей 6-пульсных УВ может быть достигнуто за счёт схмотехнических решений, т. е. последовательного или параллельного соединения мостов на полностью управляемых тиристорах, и систем активной фильтрации с использованием алгоритмов управления, что реализовано в компенсированных управляемых выпрямителях.

Расширено понятие «коммутация» для полностью запираемых ключей. Интервалом коммутации считается время перехода тока из фазы, выходящей из работы, в фазу, вступающую в работу.

Получены закономерности при выборе параметров силовой схемы УВ на ГТО-тиристорах: выбор напряжения конденсатора в УВ на ГТО-тиристорах определяется режимом работы, диапазоном регулирования и технико-

экономическими показателями УВ, а также требованиями САФ, компенсирующего определенные гармоники питающей сети.

Расширено применение метода расчета уравнивающих реакторов для параллельных схем КУВ с учетом коммутационных процессов в схемах, показано возможность применения метода без учета коммутации.

Проведен анализ кривых мгновенных значений выпрямленного напряжения параллельного КУВ с одной вентильной обмоткой трансформатора с получением коммутационных функций во всем диапазоне изменения углов управления, а также получены расчётные формулы и кривые для определения сетевых токов, позволяющие сделать вывод об улучшении формы сетевого тока б-пульсного управляемого выпрямителя.

Установлено уменьшение потерь в трансформаторе от первой гармоники сетевого тока в параллельном КУВ с одной вентильной обмоткой трансформатора, а также, что потери от высших гармоник в трансформаторе за счет несинусоидальности тока определяются гармоническим составом сетевого тока КУВ.

Предложена функциональная схема управления параллельными КУВ, учитывающая особенности построения силовых частей многопульсных параллельных КУВ и использование различных параметров в качестве критерия управления. Доказана возможность практической реализации параллельных схем КУВ путём построения компьютерных моделей для проверки работы схем в квазиустановившемся режиме, созданных в соответствии с предложенной функциональной схемой системы управления КУВ. Данные, полученные на моделях, позволяют судить о правильности теоретических результатов.

Предложена система раздельного управления токами выпрямителей, входящих в параллельный КУВ с одной вентильной обмоткой трансформатора.

Компьютерное моделирование подтвердило теоретические выводы и показало возможность практической реализации параллельных схем КУВ с улучшенными энергетическими характеристиками.

Ключевые слова: выпрямитель управляемый компенсированный, энергетические показатели качества электроэнергии, коммутация, силовой активный фильтр, коэффициент мощности.

Butova O.A. Multipulse parallel compensated controlled rectifiers with enhanced energy performance. – The manuscript.

Dissertation on competition degree of candidate of technical sciences of specialty 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy. – National Technical University «Kharkov Politechnical Institute», Kharkov, 2015.

Dissertation aims at examination electromagnetic processes and energy indicators of multipulse parallel compensated controlled rectifiers (CCR).

The basic ways to improve the energy performance of six-pulse controlled rectifiers (CR) are formulated. It is shown that an increase in energy performance of 6-pulse CR can be achieved due to circuit design, i.e. serial or parallel connection with bridges on a fully controlled thyristors and active filtration systems using multicriterial control algorithm that are implemented in compensated controlled rectifiers.

The scientific term of a «Commutation» for turn-off keys was expanded.

Widened use of the calculation method of current-balancing reactor for parallel CCR considering commutation processes in the circuit shown possibility of using excluding commutation. The analysis of the curves of the instantaneous values of the rectified voltage and curves to define the mains currents parallel CCR with one gate winding was held.

A functional scheme of the control system of the parallel circuits CCR, was taking into account the features of construction of power modules of the multipulse parallel CCR and different parameters as control criteria was developed. The system of separate control current rectifiers included in CCR parallel with one gate winding of the transformer was proposed. Computer simulation confirmed the theoretical conclusions and hence the possibility of practical realization of parallel circuits IMC with improved energy performance.

Key words: rectifier controlled compensated, energy performance, power quality, commutation, power active filter, power factor.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Gheeb', located in the lower right quadrant of the page.

Відповідальний за випуск
к.т.н. доц. кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП»
Шишкін М.А.

Підписано до друку 20.02.2015 р. Формат 60x90/16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 066834

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
ЄДРПОУ 3125131 від 19.12.2000 р.