

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Немикіна Ольга Володимирівна



УДК 621.316.12:621.314.58

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ
КРАНІВ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ПРИВОДОМ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електропостачання промислових підприємств Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
Запорізький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних та електронних апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Толочко Ольга Іванівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ
професор кафедри автоматизації електромеханічних
систем та електроприводу

кандидат технічних наук,
Луценко Іван Миколайович,
Державний вищий навчальний заклад «Національний
гірничий університет», м. Дніпропетровськ,
доцент кафедри систем електропостачання

Захист відбудеться «11» березня 2016 р. о 14 год. 00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, ауд. 400 А.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий «30» січня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент



А. М. Якімець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку з безперервним подорожчанням електроенергії в Україні та за кордоном приділяється велика увага енергозбереженню в електричних мережах.

Сучасні підйомно-транспортні засоби виконують до 70% вантажних робіт і мають тенденцію до використання частотно-регульованого приводу (ЧРП) на базі дволанкового перетворювача частоти, що якісно змінює роботу систем живлення наявністю в струмопроводах вищих гармонійних складових струму та напруги. Ланку постійного струму утворюють випрямлячі, як правило, групові, що живлять ряд інверторів за числом механізмів на кранах.

Впровадження частотно-регульованого електроприводу на кранах здійснюється шляхом модернізації існуючих кранів або закупівлею нових, які мають живлення від існуючих систем. Існуючі системи електроживлення кранів орієнтовані на системи релейно-контакторного керування з двигунами змінного або постійного струму, які мають ряд відомих недоліків.

У пуско-гальмівних режимах кранів виникають великі втрати енергії в пускових реостатах. Частка втрат з урахуванням пуско-гальмівних режимів досягає 15% від загальної витрати електричної енергії при роботі крана, з них до 30% припадає на втрати в системах живлення, реалізованих у вигляді шин або тролейних ліній.

Сучасна тенденція використання частотно-регульованого електроприводу вирішує проблему створення високоефективних систем електроприводу кранів, однак такі системи дорогі, що потребує їх коректного використання для зменшення строку окупності. Вагомий внесок у розв'язання проблеми розробки, дослідженню та впровадженню частотно-регульованих електроприводів для кранів належить вітчизняним ученим Андрієнко П.Д., Волкову О.В., Волкову І. В., Чехету Е. М., а також багатьом дослідникам різних країн та поколінь.

Однак, незважаючи на значну кількість наукових робіт, вибір системи електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом потребує докладного обґрунтування і визначається режимами роботи кранів з урахуванням особливостей перетворювачів частоти.

Наявність на вході перетворювачів частоти випрямляча або активного випрямляча з можливістю рекуперації енергії в мережу викликає потребу перегляду концепції побудови системи електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом. Місце знаходження вказаних випрямлячів – на крані або в розподільному пристрої 0,4 кВ – визначає напругу системи електроживлення кранів – змінну або постійну.

Питання перегляду концепції побудови системи електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом на базі дволанкових перетворювачів частоти та розробка методу порівняльної оцінки систем електроживлення кранів постійного та змінного струму для створення ефективних систем електроживлення кранів є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи одержані автором у процесі виконання держбюджетної науково-дослідної роботи Запорізького національного технічного університету з теми ДБ №01719 від 01.09.2009 «Розробка методів оптимізації систем електроживлення з напівпровідниковими перетворювачами й електротехнологічними установками» (номер держреєстрації 019U007668) і пов'язані з планами науково-господарчої діяльності ТОВ «НДІ «Перетворювач» зі створення перетворювачів та електроприводів для кранових установок.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування вибору раціональної системи живлення кранів, оснащених частотно-регульованим приводом з дволанковими перетворювачами частоти на основі порівняльної оцінки систем живлення кранів постійного або змінного струму за критеріями матеріальних витрат і втрат потужності, а також розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності систем електроживлення кранових установок при забезпеченні показників якості електроенергії та електромагнітної сумісності.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі основні задачі:

- аналіз стану розробок і принципів проектування систем електроживлення кранів;
- розробка методу порівняльної оцінки ефективності систем електроживлення кранів змінного та постійного струму, оснащених частотно-регульованим електроприводом з дволанковими перетворювачами частоти за критеріями: розрахункових потужностей, допустимих втрат напруги та втрат потужності у струмопроводах;
- розробка математичної моделі системи електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом на базі активного випрямляча з двосторонньою провідністю;
- дослідження електромагнітних процесів у системі електроживлення кранів змінного або постійного струму, оснащених частотно-регульованим електроприводом на базі активного випрямляча з двосторонньою провідністю;
- обґрунтування рекомендацій для підвищення ефективності нових і модернізації існуючих систем електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом на базі дволанкових перетворювачів частоти.

Об'єкт дослідження - електромагнітні процеси в системах електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом.

Предмет дослідження – критерії оцінки ефективності систем електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом при забезпеченні показників якості електроенергії й електромагнітної сумісності.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених задач у дисертаційній роботі виконано з використанням методів: розрахунку електричних кіл та електричних навантажень в системах електропостачання. Імітаційне моделювання виконано для дослідження електромагнітних процесів у

системах живлення кранів. Експериментальне дослідження використано для перевірки достовірності розробленої моделі та отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- дістав подальший розвиток метод вибору системи електроживлення кранів з частотно-регульованим електроприводом, що передбачає аналіз систем живлення на постійному або змінному струмах, який, на відміну від існуючих, використовує аналітичні співвідношення відносних значень розрахункових потужностей, перерізів струмопроводів, втрати напруги та потужності у струмопроводах, що дозволяє при порівняльній оцінці визначити відносне значення матеріальних витрат і втрат потужності у системах електроживлення кранів;

- доведено, за допомогою математичної моделі системи електроживлення кранів, що наявність гармонійних складових у фазному струмі призводить до збільшення втрат потужності до 2 разів у струмопроводах, реалізованих тролейними лініями, та втрат напруги у 2,6 рази у струмопроводах, реалізованих шинами, у порівнянні з результатами, отриманими для синусоїдального струму, що вказує на необхідність перевірочних розрахунків тролейних ліній і шин;

- вперше методом математичного моделювання встановлено що, в активному випрямлячі з двосторонньою провідністю при керуванні транзисторами імпульсами тривалістю 120° , які синхронізовані з роботою відповідних їм діодів, у режимах неробочого ходу та малих навантажень ($0 \div 0,3$) $I_{ном}$ у фазному струмі виникають високочастотні складові з гармоніками 5, 7 і вище, які погіршують значення загального спотворення форми струму (THD_I) до 200 % і більше.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

1. Результати дисертаційної роботи використано в ТОВ «НДІ Перетворювач» (м. Запоріжжя) при модернізації випрямлячів з рекуперацією енергії типу ВР-ТППТ-300-0,4 для групового живлення автономних інверторів напруги та для електропривода узгодженого обертання механізму переміщення крану з рекуперацією енергії типу МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4.

2. Метод порівняльної оцінки систем електроживлення кранів з частотно-регульованими приводами прийнятий до впровадження у ДП «ГІПРОПРОМ» (м. Запоріжжя).

3. Рекомендації щодо підвищення ефективності систем електроживлення кранів прийнято до використання у ВАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя) при модернізації кранів у цеху гарячої прокатки.

4. При виконанні аналізу систем електроживлення кранів доведено, що найбільш раціональним є варіант системи електроживлення на постійному струмі, який у порівнянні з системою електроживлення змінного струму має переваги за всіма оцінювальними критеріями:

- зниження розрахункової потужності трансформатора до 43 % при коефіцієнті використання $K_g = 0,2$ та до 23 % при $K_g = 0,5$ призводить до

зниження номінальної потужності силових трансформаторів або їх завантаження при збереженні номінальної потужності, а також зменшення перерізів струмопроводів постійного струму в порівнянні зі змінним струмом;

- зменшення перерізів струмопроводів за умови допустимої втрати напруги при використанні напруги 600 В у системи живлення постійного струму в порівнянні зі системою живлення змінним струмом напругою 380 В. При коефіцієнті потужності $\cos \varphi = 1$ зменшення перерізів знаходиться в діапазоні 61 ÷ 66 % для тролейних ліній та у діапазоні 41 ÷ 59 % - для шин залежно від перерізу струмопроводів;

- зменшення питомих втрат потужності в струмопроводах при $\cos \varphi = 1$ сягає до 74 % для тролейних ліній та до 65% - для шин.

Особистий внесок здобувача. Усі результати і висновки, які складають основний зміст дисертаційної роботи, належать дисертанту.

У друкованих працях, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належать: [1 -5] - дослідження електромагнітних процесів у мережі живлення при роботі індивідуального крана, оснащеного частотно-регульованим приводом; [6] - дослідження електромагнітних процесів у мережі живлення з частотно-регульованим приводом на розробленій моделі; [9,10] - дослідження впливу перетворювача частоти на коефіцієнт спотворення напруги живлення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2010 р, 2011 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу» (пмт. Миколаївка, АР Крим, 2007 р.; м. Алушта, АР Крим, 2009 р.; с. Кипарисне, АР Крим, 2010 р.; м. Одеса, 2011 р., 2014 р.); міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві і транспорті '2013», (2013 р); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників і студентів ЗНТУ, м. Запоріжжя, 2008÷2014 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 8 статей у фахових наукових виданнях України, у тому числі 4 статті у виданнях, що входять до переліку міжнародних науково-метричних баз. Без співавторів опубліковано 3 статті.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел (135 найменувань) та 7 додатків. Основний зміст викладено на 110 сторінках друкованого тексту, що містить 42 рисунка та 16 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 148 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію результатів дисертації, наведено відомості про апробацію та публікації.

У *першому розділі* виконано огляд літератури, яка присвячена проблемі існуючих систем електроживлення кранів (СЕК) з частотно-регульованим приводом (ЧРП) та без ЧРП. Встановлено, що існуючі СЕК виконуються переважно на змінному струмі. На постійному струмі - в основному для металургійних виробництв.

Взагалі, впровадження ЧРП виконується в існуючих СЕК на змінному струмі. Помітна тенденція використання 4q перетворювачів для реалізації рекуперації і для групового живлення інверторів електроприводів кранів шляхом організації шини постійного струму на крані. Вказана система має ряд недоліків: велика вартість, необхідність вирішення проблем електромагнітної сумісності (ЕМС) та показників якості електроенергії (ПЯЕ) кожного крану з системою живлення, що значно ускладнює електрообладнання кранів та забезпечення необхідних ПЯЕ та ЕМС. Таким чином, наростаюче впровадження ЧРП на кранах потребує перегляду концепції побудови СЕК з ЧРП, які раніше були орієнтовані на використання електроприводів змінного синусоїдального струму.

Другий розділ присвячений розробці методу порівняльної оцінки СЕК з ЧРП постійного і змінного струму.

Для оцінювання використовувались наступні критерії:

- відносний коефіцієнт розрахункової потужності СЕК;
- відносний коефіцієнт перерізу шин та тролейних ліній за умови нагрівання;
- відносний коефіцієнт перерізу та граничної довжини шин та тролейних ліній за умови втрати напруги;
- відносний коефіцієнт втрат потужності в струмопроводах СЕК.

Розроблено структурну схему СЕК з ЧРП (рис. 1). При дослідженні використовувались вихідні дані:

– для шин змінного струму – СЕК причалу «Южний» Одеської обл., яка має чотири порталних крани типу «Сокіл» з сумарною номінальною потужністю кожного крана 243,6 кВт, довжина причалу – 300 м, (рис. 2);

– для тролейних ліній постійного струму – СЕК цеху гарячекатаної сталі ВАТ «Запоріжсталь», яка має п'ять мостових кранів. Чотири - вантажопідйомністю 80 т і один кран - 50 т. Сумарна номінальна потужність кожного крана вантажопідйомністю 80 т - 175,8 кВт та вантажопідйомністю 50 т - 74,2 кВт, довжина цеху – 290 м, (рис. 3).

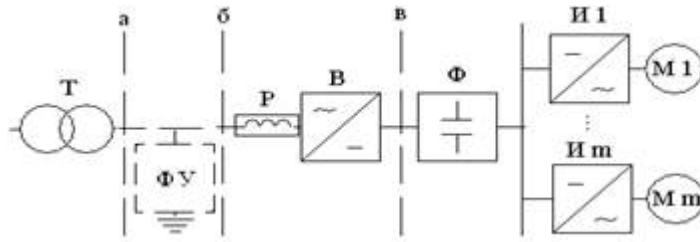


Рисунок 1 – Структурна схема СЕК

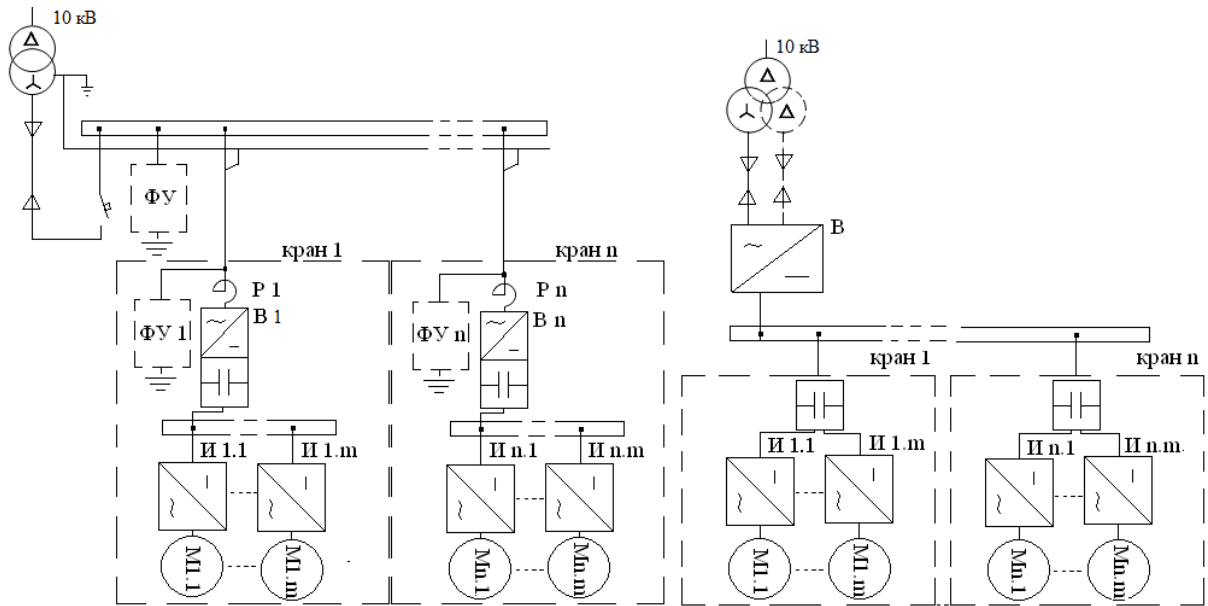


Рисунок 2 – Схема СЕК змінного струму

Рисунок 3 – Схема СЕК постійного струму

Розрахункову потужність СЕК визначено методом впорядкованих діаграм. Отриманий відносний коефіцієнт розрахункової потужності має вигляд:

$$P^*_{\text{розр}} = \frac{P_{\text{розр-}}}{P_{\text{розр~}}} = k^*_{\text{max}} = \frac{k_{\text{max-}}}{k_{\text{max~}}} = \frac{(\sqrt{k_B n_{\text{еф-}}} + 1,5\sqrt{1-k_B})}{\sqrt{n^*_{\text{еф}} \cdot (\sqrt{k_B n_{\text{еф~}}} + 1,5\sqrt{1-k_B})}} \quad (1)$$

де $P_{\text{розр-}}$, $P_{\text{розр~}}$ - розрахункова потужність СЕК постійного та змінного струму, відповідно; $n^*_{\text{еф}} = n_{\text{еф-}} / n_{\text{еф~}}$ - відносна кількість електроприймачів; $n_{\text{еф-}}$, $n_{\text{еф~}}$ - кількість електроприймачів постійного і змінного струму, відповідно; k_B - середньозважений коефіцієнт використання. Для оцінки можливості використання аналітичних залежностей відносного коефіцієнту розрахункової потужності було проведено порівняння відносного коефіцієнту максимуму $k^*_{\text{max}} = k_{\text{max~}} / k_{\text{max-}}$ та відносного розрахункового коефіцієнту $k^*_{\text{розр}} = k_{\text{розр~}} / k_{\text{розр-}}$ та їх похибки Δk^* .

Залежності $\Delta k^* = f(n_{\text{еф}}^*), P_{\text{розр}}^* = f(n_{\text{еф}}^*)$, при $k_{\text{в}} = \text{const}$ наведено на рис. 4:

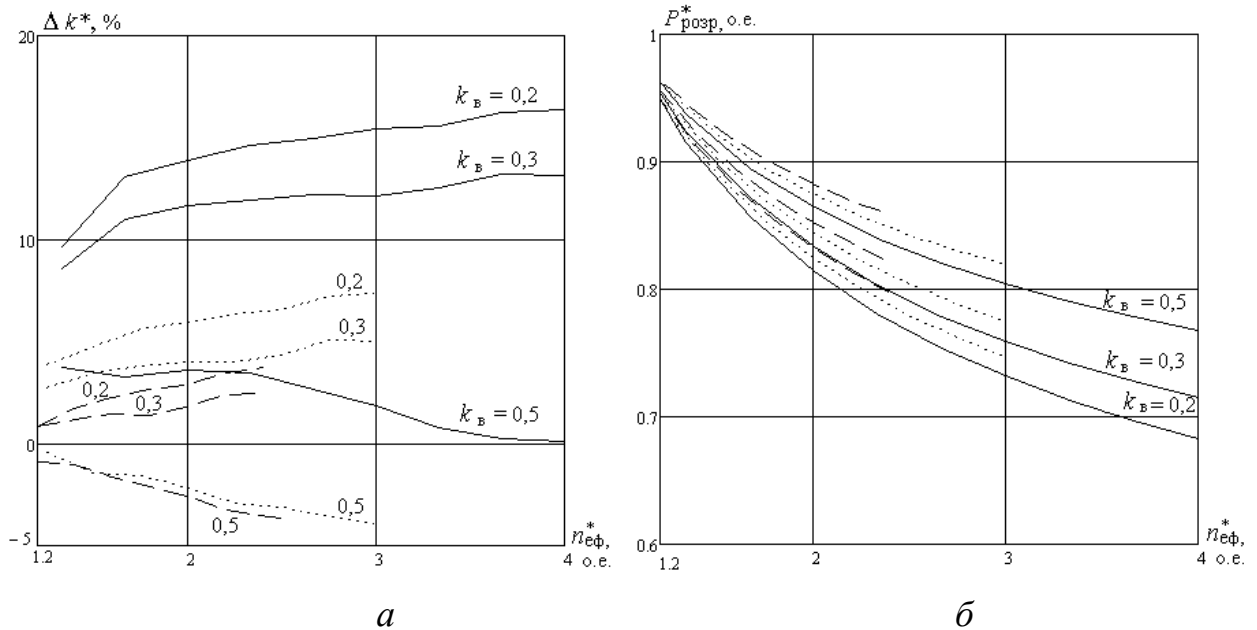


Рисунок 4 – Залежності: а) $\Delta k^* = f(n_{\text{еф}}^*)$, б) $P_{\text{розр}}^* = f(n_{\text{еф}}^*)$,
 $n_{\text{еф}} \sim 3(-), n_{\text{еф}} \sim 4(\cdot \cdot \cdot), n_{\text{еф}} \sim 5(- -)$

Аналіз залежностей ($\Delta k^* = (k_{\text{max}}^* - k_{\text{розр}}^*)100\%/k_{\text{max}}^*$) показує, що при $n_{\text{еф}} \sim 3$ та $k_{\text{в}} \geq 0,3$ похибка складає не більше 5%. Для $n_{\text{еф}} \sim 3$ та $k_{\text{в}} = 0,2 \div 0,3$ при перевірочних розрахунках потрібно враховувати похибку апроксимовану у вигляді $\Delta k^{**} = 0,9 - 0,01 \cdot n_{\text{эф}}^*$.

На базі розрахункової потужності одержано вираз для відносного коефіцієнту перерізу ступмопроводів за умови нагрівання:

$$S_{\text{ш}(\tau)}^* = \frac{S_{\text{ш}(\tau)_-}}{S_{\text{ш}(\tau)_\sim}} = \frac{1,28 \cos \varphi}{j_{\text{ш}(\tau)}^*} \cdot \frac{(\sqrt{k_{\text{в}} n_{\text{еф}}^*} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{в}}})}{\sqrt{n_{\text{еф}}^*} \cdot (\sqrt{k_{\text{в}} n_{\text{еф}}^*} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{в}}})}, \quad (2)$$

де $S_{\text{ш}(\tau)}^*$, $S_{\text{ш}(\tau)_-}$, $S_{\text{ш}(\tau)_\sim}$ - значення відносного коефіцієнту перерізу, переріз ступмопроводів постійного та змінного струму; $j_{\text{ш}(\tau)}^* = j_-/j_\sim$ - відносне значення щільності шини або тролейної лінії; j_- , j_\sim - щільність постійного та змінного струму ступмопроводів, відповідно; $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності.

Залежності відносного коефіцієнту перерізу шин та тролейних ліній $S_{\text{ш}(\tau)}^* = f(n_{\text{еф}}^*)$ при $\cos \varphi = 0,5$ та $\cos \varphi = 1$ наведено на рис.5. Залежності $S_{\text{ш}(\tau)}^*$ отримані при використанні шин мінімальних та максимальних перерізів, відповідно $j_{\text{ш}}^* = 1,01 \div 1,1$ та при використанні тролейних ліній мінімальних та максимальних перерізів, відповідно $j_{\text{т}}^* = 1,46 \div 2,2$.

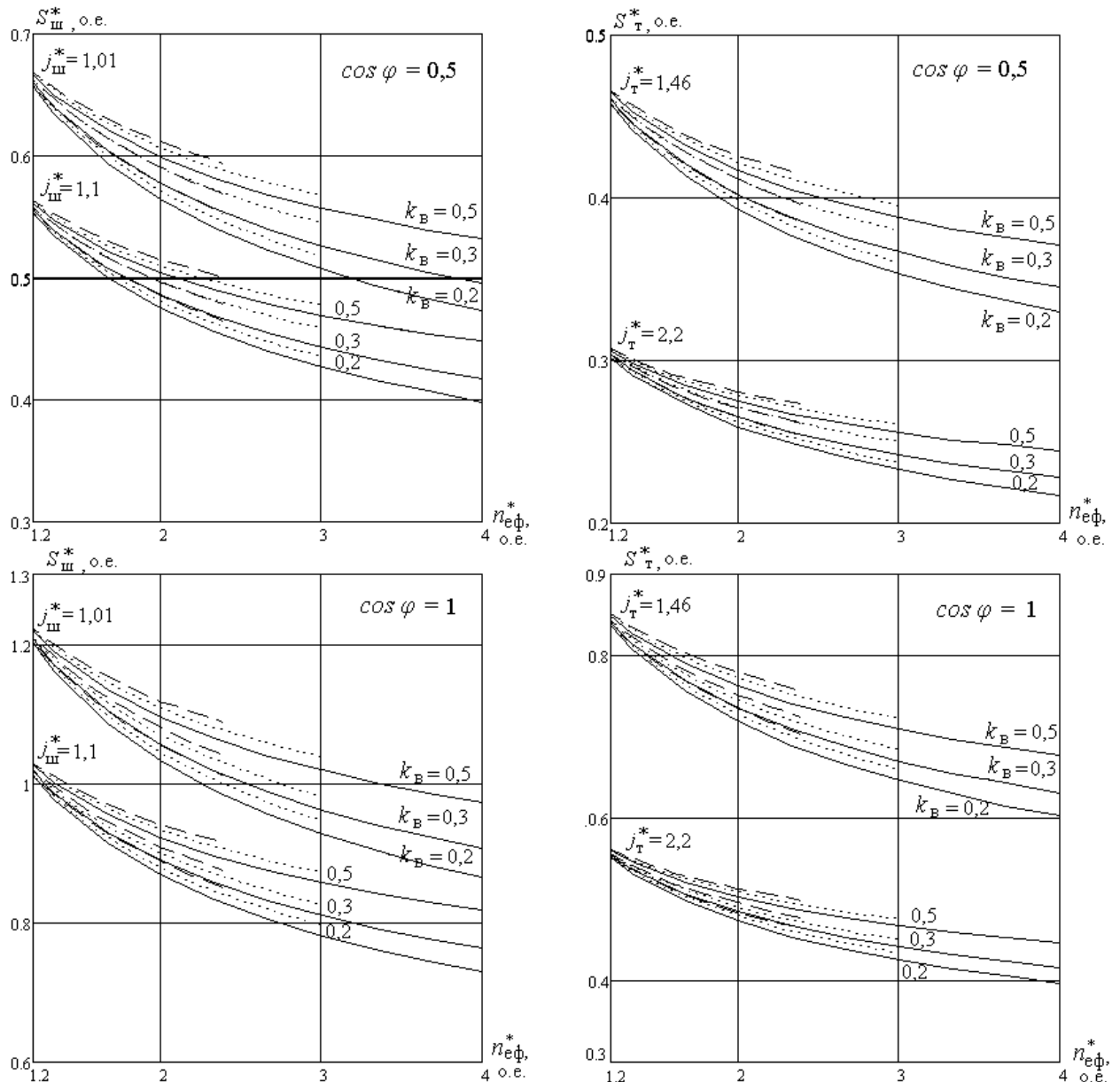


Рисунок 5 – Залежності $S_{ш(τ)}^* = f(n_{эф}^*)$

при $k_ε = const, n_{эф} \sim 3(-), n_{эф} \sim 4(\cdot\cdot), n_{эф} \sim 5(- -)$

Аналіз рис. 5 показує, що за умов нагрівання найбільше зниження перерізу сягає для тролейних ліній в залежності від значень $j_{τ}^*$ та k_B .

Найменше значення відносного коефіцієнту перерізу мають СЕК постійного струму відносно СЕК змінного струму з $\cos \varphi = 0,5$. При $\cos \varphi = 1$ зменшення перерізу залежить від відносного значення щільності шини або тролейної лінії та від значення $n_{эф}^*$.

Відносний коефіцієнт перерізу струмопроводів визначено за умови виконання допустимих втрат напруги на змінному струмі - 5 %, на постійному – 4 %, і має вигляд:

$$S_{ш(τ)}^* = \frac{S_{ш(τ)}}{S_{ш(τ)\sim}} = \frac{1,36 \cdot \cos \varphi \cdot P^*_{розр}}{(\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(τ)} \cdot \sin \varphi) \cdot K^*}, \quad (3)$$

де $K^* = K_-/K_+$; K_- ; K_+ - відношення провідностей; провідність постійного та змінного струму, відповідно; $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)} = X_{\text{ш}(\tau)}/R_{\text{ш}(\tau)}$; $X_{\text{ш}(\tau)}$, $R_{\text{ш}(\tau)}$ - індуктивний та активний опір шин або тролейної лінії, відповідно.

Вираз (3) дозволяє визначити значення $S_{\text{ш}(\tau)}^*$ при однаковій граничній довжині, $l_{\text{гр}}^* = 1$.

Відносний коефіцієнт граничної довжини при $S_{\text{ш}(\tau)}^* = 1$ за умови виконання допустимих втрат напруги має вигляд:

$$l_{\text{гр}}^* = \frac{l_{\text{гр}-}}{l_{\text{гр}\sim}} = \frac{0,94 \cdot K^* \cdot (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)} \cdot \sin \varphi)}{j_{\text{ш}(\tau)}^*}, \quad (4)$$

де $l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр}-}/l_{\text{гр}\sim}$; $l_{\text{гр}-}$; $l_{\text{гр}\sim}$ - відносний коефіцієнт граничної довжини шини або тролейної лінії; довжина струмопроводів постійного та змінного струму, відповідно.

Значення $S_{\text{ш}(\tau)}^*$ суттєво залежать від функції $f1(\varphi, \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)}) = (\cos \varphi / (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)} \cdot \sin \varphi))$.

Залежності $f1(\varphi, \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)})$ та залежності відносних коефіцієнтів перерізу шин і тролейних ліній наведено на рис. 6.

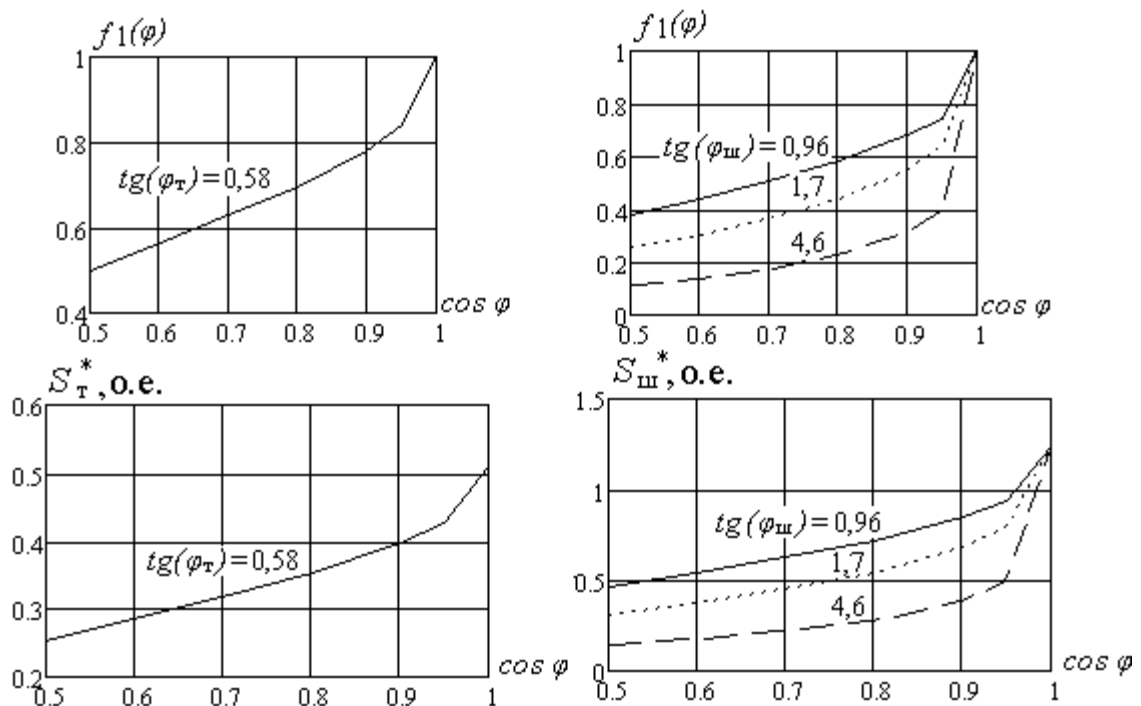


Рисунок 6 – Залежності $f1(\varphi, \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)}) = f(\cos \varphi)$

та $S_{\tau}^* = f(\cos \varphi)$, $S_{\text{ш}}^* = f(\cos \varphi)$

Аналізуючи залежності $f1(\varphi, \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}(\tau)})$ встановлено високу швидкість її зміни при варіації $\cos \varphi$ в межах 0,95 - 1,0, що відповідно впливає на

відносний коефіцієнт перерізу $S_{ш(\tau)}^*$ в діапазоні реальних значень коефіцієнта потужності електроприводів з ЧРП. Значення функції $f1(\varphi, tg \varphi_{ш(\tau)})$ сягає 0,84 при $tg \varphi_{\tau} = 0,58$ та $0,4 \div 0,74$ при $tg \varphi_{ш} = 0,96 \div 4,6$ при значенні $cos \varphi = 0,95$.

Як видно з рис. 6, відносний коефіцієнт перерізу шин та тролейних ліній пропорційний $f1(\varphi, tg \varphi_{ш(\tau)})$. При збільшенні $tg \varphi_{ш}$ відносний коефіцієнт перерізу істотно зменшується, що говорить о доцільності використання постійного стуму в СЕК з ЧРП.

Для відносного коефіцієнта питомих втрат потужності в струмопроводах, виконаних шинами або тролейними лініями, одержано вираз:

$$\Delta P_{ш(\tau)}^* = 0,36 \frac{l_{гр}^*}{K^* \cdot S_{ш(\tau)}^*} (\cos \varphi)^2 \quad (5)$$

Графік залежності $\Delta P_{ш(\tau)}^*$ для $l_{гр}^* = 1$ та $S_{ш(\tau)}^* = 1$ від $cos \varphi$ наведено на рис. 7.

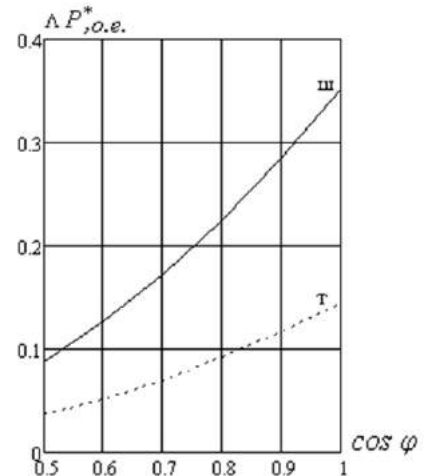


Рисунок 7 – Залежності $\Delta P_{ш(\tau)}^* = f(\cos \varphi)$

Аналіз порівняльних досліджень показує суттєву перевагу СЕК з ЧРП постійного струму за всіма порівнювальними критеріями:

- зниження розрахункової потужності трансформатора при $n_{\text{еф}}^* = 4$ складає 43 % для $k_{\text{е}} = 0,2$ и 23 % при $k_{\text{е}} = 0,5$ дозволяє знизити номінальну потужність силових трансформаторів або їх завантаження при збереженні номінальної потужності, а також зменшити переріз струмопроводів систем живлення постійного струму в порівнянні зі змінним струмом;

- зменшення перерізу струмопроводу за умови нагріву залежно від використовуваного перерізу струмопроводу за рахунок відсутності поверхневого ефекту у струмопроводу постійного струму: при коефіцієнті потужності $cos \varphi = 0,5$, $n_{\text{еф}}^* = 4$, та $k_{\text{е}} = 0,5$ зменшення перерізу шин знаходиться в діапазоні $46,8 \div 55$ % та тролейних ліній - $63 \div 75,6$ %; при $k_{\text{е}} = 0,2$ зменшення перерізу шин знаходиться в діапазоні $52,7 \div 60,2$ % та тролейних ліній - $67 \div 78,3$ %. При $cos \varphi = 1$, $n_{\text{еф}}^* = 4$ та $k_{\text{е}} = 0,5$ зменшення перерізу шин знаходиться в діапазоні $3 \div 18$ % та тролейних ліній - $33,2 \div 55,3$ %; при $k_{\text{е}} = 0,2$ зменшення перерізу шин знаходиться в діапазоні $13,4 \div 27$ %, та тролейних ліній - $40 \div 60$ %.

- зменшення перерізу струмопроводів за умови допустимої втрати напруги при використанні напруги 600 В у СЕК постійного струму в порівнянні зі змінним струмом напругою 380 В залежно від перерізу струмопроводів при $cos \varphi = 0,5$ або $cos \varphi = 1$ знаходиться в діапазоні $80,5 \div$

83% або $61 \div 66 \%$ для тролейних ліній та в діапазоні $77 \div 91\%$ або $41 \div 59 \%$ - для шин;

- зменшення питомих втрат потужності в струмопроводах при $\cos \varphi = 0,5$ або $\cos \varphi = 1$ при використанні тролейних ліній сягає до 94 % або до 74 %, при використанні шин сягає до 91 % або до 65 %.

Дотримання $\cos \varphi = 1$ в ЧРП зменшує матеріальні витрати і втрати потужності, але СЕК постійного струму має перевагу в зв'язку з тим, що щільність постійного струму вища, ніж щільність змінного струму.

Третій розділ присвячений дослідженню електромагнітних процесів в активному випрямлячеві (АВ) з двосторонньою провідністю, яка досягається синхронізацією роботи ключів з роботою відповідних діодів випрямляча. В [2-5] має назву «прозорий».

В режимі споживання (РС) та режимі рекуперації (РР) електромагнітні процеси мають особливість в момент комутації ключів.

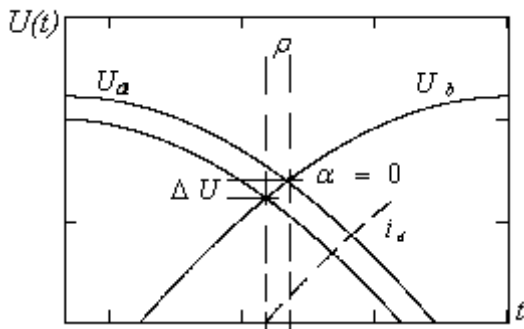
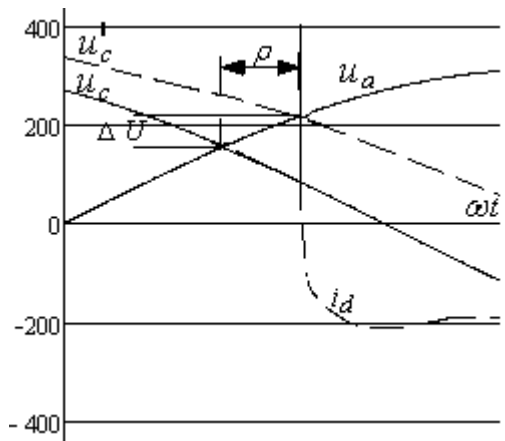


Рисунок 8 – Комутація в АВ в режимі споживання

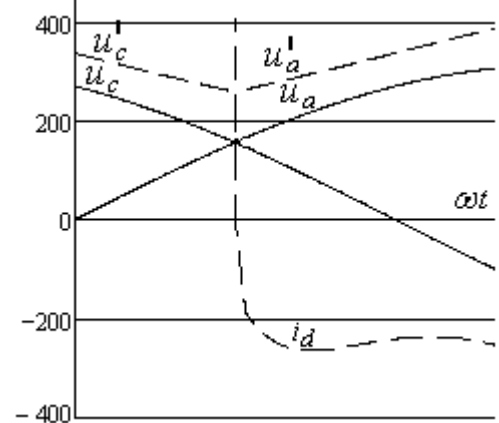
Комутація в АВ в РС відбувається при напрузі фази менше на падіння напруги $\Delta U = I_d R_\phi$ (рис.8), що викликає зсув комутації в сторону випередження на величину ρ . На відміну від комутації діодів комутація ключів в РР має зсув фаз ρ в сторону відставання (рис. 9 а). Величина кута зсуву ρ визначається з виразу (6):

$$\rho = \arcsin \left(\mp \frac{I_d R_\phi}{\sqrt{2} U_\pi} \right), \quad (6)$$

де \mp, I_d, R_ϕ, U_π - (-) –РС, (+) - РР, значення струму при комутації, активний опір фази, лінійна напруга, відповідно.



а – синхронізація ключів з вхідною напругою випрямляча



б – синхронізація ключів з напругою джерела живлення

Рисунок 9 – Комутація в АВ в режимі рекуперації

На рис. 9 а и 9 б наведено осцилограми моменту комутації в РР при різних способах синхронізації роботи ключів АВ. На рис 9 а приведена осцилограма при комутації ключів АВ, синхронізованих з входною напругою відповідних діодів. Величина кута зсуву ρ сягає 6° , що достатньо точно збігається з розрахунком. Зазначений недолік істотно проявляється в СЕК, реалізованими тролейними лініями, які мають більший активний опір в порівнянні з СЕК, реалізованих шинами.

Наявність кута зсуву викликає споживання реактивної потужності до 10%. Для ліквідації цього недоліку синхронізація ключів АВ виконується з напругою джерела живлення, рис 9 б, при якій відсутній кут зсуву комутації.

На основі схеми заміщення було розроблено імітаційну модель СЕК з ЧРП, в якій рекуперація енергії відбувається за допомогою вказаного АВ. Осцилограми струму в режимі споживання та режимі рекуперації, та в режимі неробочого ходу наведені на рис. 10 а та рис. 10 б та рис. 10 в.

При гармонійному аналізі встановлено, що в режимі неробочого ходу, рис 10 в у фазному струмі присутні високочастотні складові, значення THD_I сягає близько 200 %, що негативно впливає на роботу СЕК.

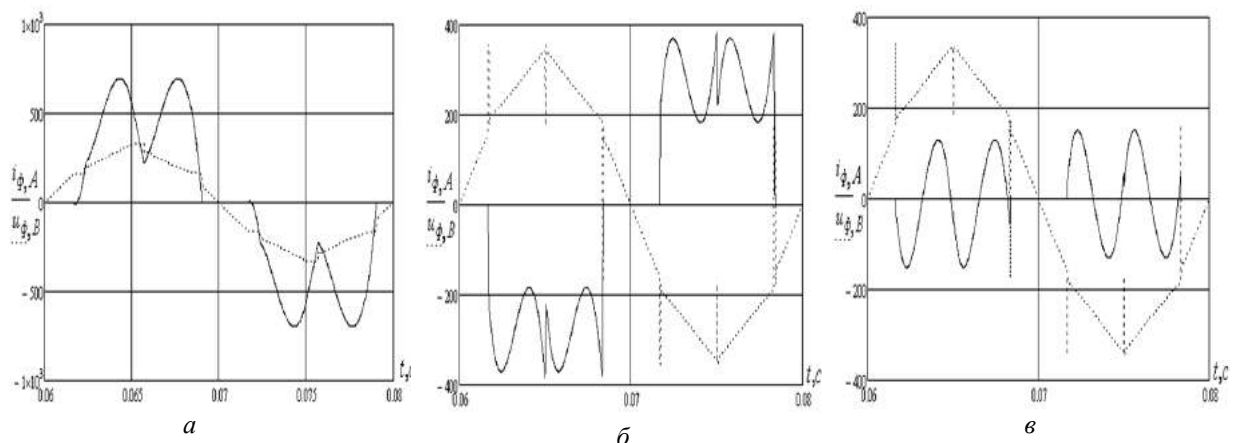


Рисунок 10 – Осцилограми фазного струму (i_ϕ) та напруги (u_ϕ) в режимі споживання $I_i = 500$ А та рекуперації $I_i = -250$ А, та неробочого ходу; $U_{кз} (S_{нч}) = 3,1$ %

Також виявлено, що у режимі споживання максимальне значення має п'ята гармоніка, а у режимі рекуперації - 7-а гармоніка.

Встановлено, що співвідношення середніх значень початково-безперервних струмів визначається співвідношенням вольт секундної площі між лінійною напругою (U_L) і напругою на ємності фільтру ($U_{сф}$) для РС і РР та має значення 1,91. У РС та РР початково- безперервного струму 5 гармоніка сягає 50% від основної. У РС 7, 11, 13 гармоніки сягають, відповідно, 22%, 7% , 6%, у РР вони, відповідно, вдвічі більше. Доля 17 і 19 гармонік в РР сягає, відповідно, 9,6 і 6,7 %, що більше ніж втричі перевищує відповідні значення в РС. Ця обставина ускладнює вибір параметрів резонансних фільтрів.

За результатами моделювання гармонійного складу було проведено перевірку втрат потужності і напруги з урахуванням гармонійних складових. Аналіз показав, що наявність вищих складових призводить до збільшення втрат потужності в СЕК з ЧРП з тролейними лініями для досліджуваних випадків у 2 рази, а втрати напруги для шин зростають практично до 2,6 раз. Наведені обставини вказують на необхідність додаткової перевірки втрат напруги з урахуванням особливостей реалізації схем перетворювачів частоти для кранів і конструкції струмопроводів.

Моделювання процесів при одночасній роботі кранів змінного струму показало, що перетворювачі частоти без вхідних реакторів мають великий взаємний вплив і призводять до підвищення THD_I на шині змінного струму, який досягає 70-75%. Встановлення реакторів з $U_{кз} \approx 4,5\%$ на кожному крані суттєво знижує взаємний вплив і покращує THD_I на шині змінного струму та в точці підключення джерела живлення - на розподільному пункті (РП) - 0,4 кВ. Значення THD_I на РП - 0,4 кВ сягає до 27,6-31,5% відповідно в РС та РР.

При моделюванні СЕК постійного струму встановлено, що наявність індуктивності в тролейній лінії суттєво змінює форму фазного струму, яка стає практично прямокутною в обох режимах, рис.11. THD_I на РП - 0,4 кВ сягає 18,7 та 19,9 %, коефіцієнт спотворення напруги (K_U) сягає 5,3 та 7,9 % відповідно в РС та РР, що відповідає умовам стандартів МЕК, ІЕЕЕ та ГОСТ 13109-97.

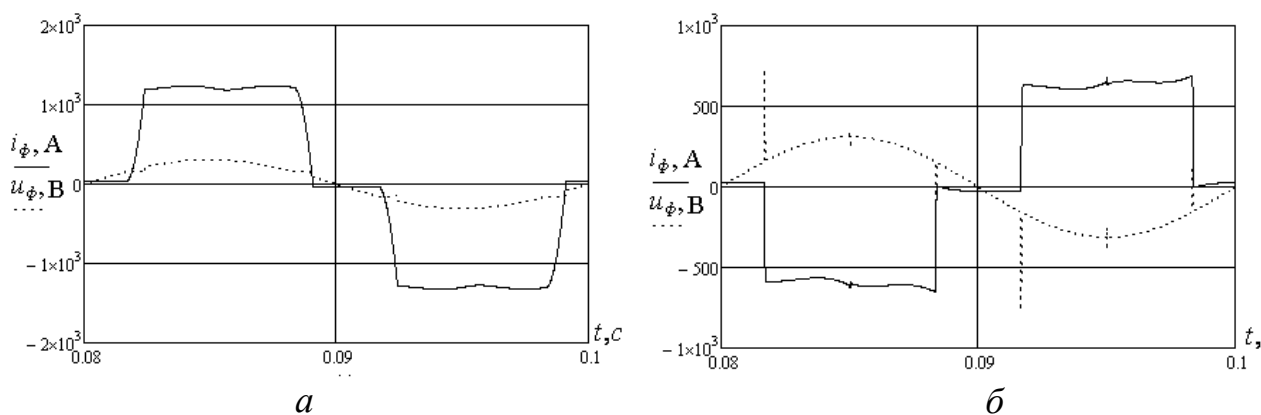


Рисунок 11 – Осцилограми фазного струму (i_ϕ) та напруги (u_ϕ) на РП-0,4кВ, в режимі споживання та рекуперації; $L_{dT} = 0,36 \cdot 10^{-3}$ Гн

В СЕК постійного струму з ЧРП індуктивність шин на порядок менша, ніж у тролейних ліній, тому THD_I на РП - 0,4 кВ зростає до 26,5 та 30,5 % та K_U до 5,8% та 9,3% відповідно в РС та РР. Значення коефіцієнту THD_I відповідають умовам стандарту МЕК в РС та РР та не відповідають умовам ІЕЕЕ. Значення коефіцієнту K_U відповідають умовам ГОСТ 13109-97 в РС та не відповідають цим же умовам в РР, що потребує проведення заходів до забезпечення ПЯЕ і ЕМС.

У четвертому розділі розроблено методологію вибору систем живлення кранів та рекомендації щодо підвищення ефективності СЕК з ЧРП, при

забезпеченні ПЯЕ та ЕМС. Підвищення ефективності СЕК з ЧРП досягається при використанні системи живлення постійного струму.

Для реалізації режиму рекуперації раціонально використовувати АВ з двосторонньою провідністю. Для покращення ПЯЕ та ЕМС запропоновано систему керування АВ з двосторонньою провідністю, що виключає генерацію високочастотних складових у режимі неробочого ходу, а також імпульсне формування прямокутного струму при режимі рекуперації.

Покращення THD_I у режимі рекуперації СЕК з шиною змінного струму виконується використанням системи керування АВ з імпульсним формуванням струму на заданому рівні, що дозволяє виконати фазний струм практично прямокутним, рис. 12. Розроблено імітаційну модель з реалізацією імпульсного формування прямокутного струму. THD_I у вказаному режимі становить 20 % рис. 12 а. Експериментально перевірено роботу системи керування з імпульсним формуванням прямокутного струму в режимі рекуперації, рис. 12 б.

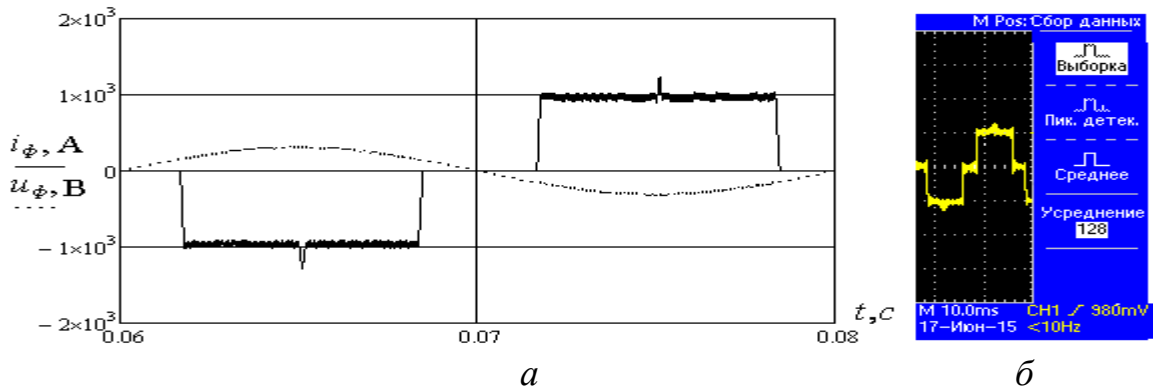


Рисунок 12 – Осцилограми фазного струму (i_ϕ) на РП-0,4кВ на моделі(а) та експериментальна (б) в режимі рекуперації

Для СЕК з шиною постійного струму покращення ПЯЕ та ЕМС виконується використанням 12 - пульсного АВ з послідовним з'єднанням мостів. Значення коефіцієнтів THD_I , K_u , $\cos\phi$, ν , λ у режимі споживання та режимі рекуперації на РП -0,4кВ наведено в табл. 1.

Таблиця 1- Значення коефіцієнтів THD_I , K_u , $\cos\phi$, ν , λ на РП-0,4кВ

	THD_I	K_u , %	$\cos\phi$	ν	λ
РС	16,9	4	0,93	0,98	0,91
РР	19,8	7,9	0,99	0,98	0,98

Аналіз даних (табл. 1) показує, що значення ПЯЕ та ЕМС відповідають умовам ГОСТ 13109-97, МЭК та ІЕЕЕ в режимі споживання та рекуперації .

Висновки. В роботі вирішено науково-прикладну задачу комплексного порівняльного дослідження систем електроживлення кранів оснащених ЧРП, спрямовану на підвищення їх ефективності.

1) Підвищення ефективності СЕК з ЧРП досягається при використанні систем живлення постійного струму. Розроблений метод визначення

відносних коефіцієнтів порівняльної оцінки систем живлення постійного і змінного струму дозволив оцінити підвищення ефективності СЕК постійного струму. Підвищення ефективності досягається за рахунок: зниження розрахункової потужності трансформатора, зниження перерізу струмопроводів за умови нагріву, зниження перерізу струмопроводів або збільшення граничної довжини ділянки струмопроводів за умови допустимої втрати напруги та зменшення питомих втрат потужності в струмопроводах.

2) Розроблено математичну модель системи живлення кранів, яка дає змогу дослідити залежність показників якості та залежність електромагнітної сумісності від довжини струмопроводу та значення ПКЕ та ЕМС на РП -0,4 кВ трансформатору.

3) В якості джерела постійного струму запропоновано використовувати АВ з двосторонньою провідністю, який має меншу встановлену потужність основних елементів, просту систему керування, відносно жорстку зовнішню характеристику у порівнянні з АВ у режимі ШІМ з корекцією коефіцієнта потужності. Розроблено рекомендації щодо побудови системи керування транзисторами АВ з двосторонньою провідністю, яка забезпечує покращення ПЯЕ і ЕМС при режимі неробочого ходу та режимі рекуперації.

4) Показано, що в СЕК з ЧРП постійного струму, яка виконана тролейними лініями можливо забезпечення показників ЕМС без допоміжних пристроїв. Найбільш доцільним засобом для забезпечення ЕМС для СЕК з шинами постійного струму є використання 12-пульсного АВ з двосторонньою провідністю. У СЕК змінного струму для покращення показників ЕМС при рекуперації необхідно використовувати імпульсне формування прямокутного струму.

5) Результати дисертаційної роботи використані в ТОВ «НДІ Перетворювач» (м. Запоріжжя) при модернізації випрямлячів з рекуперацією енергії типу ВР-ТППТ-300-0,4 для групового живлення автономних інверторів напруги та для електропривода узгодженого обертання механізму переміщення крану з рекуперацією енергії типу МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4.

Метод порівняльної оцінки СЕК з ЧРП прийнятий до впровадження в «ГІПРОПРОМ» (м. Запоріжжя).

Рекомендації до використання СЕК постійного струму з ЧРП прийняті при модернізації кранів у цеху гарячої прокатки ВАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андриенко П. Д. Анализ электромагнитных процессов выпрямительно - инверторного преобразователя на математической модели / П. Д. Андриенко, О. В. Немькина // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 1. Киев, 2004. - С. 122 - 125.

2. Андриенко П. Д. Влияние входного LC-фильтра 4 q-S преобразователя на процессы энергообмена в системе «Электропривод-сеть» / П. Д. Андриенко, А. П. Заболотный, О. В. Немыкина // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета.- Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С.530 – 531

3. Заболотный А. П. Моделирование электромагнитных процессов в электроприводе, построенном на основе 4Q-S преобразователя / А. П. Заболотный, О. В. Немыкина // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков: НТУ «ХПИ», - 2008.- Вып.30.- С.232.

4. Андриенко П. Д. Анализ электромагнитных процессов в электроприводе, построенном на 4Q-S преобразователе / П. Д. Андриенко, А. П. Заболотный, О. В. Немыкина, Д. О. Кравченко // Электроинформ - Львов: ЕКОинформ, 2009. - С. 260-262.

5. Авдеев И. В. Способы улучшения коэффициента искажения сети, питающей частотно-регулируемый электропривод / И. В. Авдеев, В. Л. Прихно, О. В. Немыкина, Ю. А. Иваничкин // Електромеханічні та енергетичні системи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів Кременчук: КрДУ, 2010.- С.182-185.

6. Андриенко П. Д. Разработка модели выпрямителя с рекуперацией для группового питания электроприемников/ П. Д. Андриенко, А.Н. Клишко, А. А. Шрам, О. В. Немыкина // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010.- Вып. 28 – С. 438-439.

7. Немыкина О.В. Энергосберегающий аспект при выборе индуктивности сети, питающей частотно-регулируемый привод / О. В. Немыкина // Электромеханические и энергосберегающие системы. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14). – С.101-104.

8. Немыкина О. В. Исследование процессов в сети, питающей группу частотно-регулируемых приводов для крановых установок / О. В. Немыкина // Электротехнические и компьютерные системы – К.: «Техника» - 2011. № 03(79) - С.355-356.

9. Авдеев І. В. Вплив на показники якості електроенергії вхідної індуктивності мережі, що живить частотно-регульований привод / Авдеев І. В., Немыкина О. В., Клишко О. М., Прихно В. Л., Баранец В. В. // Електротехніка і електроенергетика. – Запорожье, 2012. № 1.- С.51-57.

10. Кошеленко Б. Б. Влияние преобразователей частоты на качество электроэнергии при рекуперации / Б. Б. Кошеленко, О. В. Немыкина, С. Е. Фащенко // Сборник научных трудов SWorld.- Выпуск 4. Том 16.- Одесса: МАРКОВА: -2013.- С.62-67.

11. Немыкина О. В. Сравнительный анализ построения сети электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом / О. В. Немыкина

// Электротехнические и компьютерные системы – К.: «Техника» -2014. Вип. 15 (91). - С.357-359.

12. Немыкина О. В. Выбор системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом / О. В. Немыкина // Электротехнические и компьютерные системы – К.: «Техника» -2015. Вип. 19 (95). - С.54-57.

АНОТАЦІЯ

Немикіна О.В. Підвищення ефективності систем електроживлення кранів з частотно-регульованим приводом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. - Одеський національний політехнічний університет, Одеса, - 2016.

Робота спрямована на підвищення ефективності систем електроживлення кранів з частотно-регульованим приводом за рахунок удосконалення методів аналізу існуючих систем електроживлення і розробку рекомендацій при проектуванні систем електроживлення кранів з частотно-регульованим приводом. В роботі отримав подальший розвиток методу вибору систем електроживлення на основі порівняльної оцінки систем електроживлення кранів постійного та змінного струму при використанні дволанкових перетворювачів частоти у частотно-регульованому приводі. Отримано аналітичні співвідношення параметрів порівняльної оцінки за критеріями: розрахункової потужності трансформаторів, перерізу та граничної довжини струмопроводів за умовою втрати напруги, втрат потужності в струмопроводах систем живлення. Аналіз співвідношень показав вагому перевагу систем живлення кранів постійного струму з частотно-регульованим приводом за всіма критеріями. Запропоновано для рекуперації енергії використовувати активний випрямляч з двосторонньою провідністю. На розробленій імітаційній моделі проведено дослідження систем живлення кранів постійного та змінного струму з частотно-регульованим приводом, що дозволило виявити нові особливості електромагнітних процесів. Розроблено рекомендації щодо підвищення електромагнітної сумісності та показників якості електроенергії в системах електроживлення кранів змінного та постійного струму з частотно-регульованим приводом.

Ключові слова: система, електроживлення, частотно-регульований привід, активний випрямляч, ефективність.

АННОТАЦИЯ

Немыкина О.В. Повышение эффективности систем электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы.- Одесский национальный политехнический университет, Одесса, - 2016.

Работа направлена на повышения эффективности систем электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом путем усовершенствования методов анализа существующих систем питания и разработки рекомендаций при проектировании систем электропитания кранов или модернизации существующих систем питания с частотно-регулируемым приводом. В работе получил дальнейшее развитие метод сравнительной оценки систем питания кранов постоянного и переменного тока с частотно-регулируемым приводом на базе двухзвенного преобразователя частоты. Получены аналитические соотношения параметров систем питания кранов постоянного к переменному току по критериям: расчетной мощности трансформатора, сечению и граничной длины токопроводов по условию потери напряжения, потерь мощности в токопроводах. Анализ показал преимущество систем питания кранов, оснащенных частотно-регулируемым приводом с двухзвенными преобразователями частоты, на постоянном токе по сравнению с переменным током по всем критериям.

Для рекуперации энергии предложено использовать активной выпрямитель с двухсторонней проводимостью с целью снижения потребления электроэнергии. Усовершенствовано математическую модель системы питания кранов с активным выпрямителем с двухсторонней проводимостью. Проведенные исследования на модели позволили выявить ряд особенностей электромагнитных процессов: наличие высокочастотных составляющих в фазном токе в режиме холостого хода с THD_I более 200%, наличие отстающего угла сдвига фазного тока по основной гармонике в режиме рекуперации энергии, значение которого определяется величиной активного сопротивления фазы и тока в момент коммутации. Построены зависимости показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости от длины токопровода.

Разработаны рекомендации по повышению показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью для систем питания постоянного и переменного тока. Для обеспечения электромагнитной совместимости активного выпрямителя с сетью систем питания переменного тока необходимо вводить импульсное формирование прямоугольного тока при рекуперации. Обеспечение электромагнитной совместимости активного выпрямителя с сетью для систем питания постоянного тока, реализованных шинами, осуществляется применением 12-пульсного активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью.

Результаты диссертационной работы использованы в ОАО «НИИ Преобразователь» при модернизации выпрямителей с рекуперацией энергии типа ВР – ТППТ – 300 – 0,4 для группового питания автономных инверторов напряжения и инвертора для рекуперации энергии в сеть в электроприводе согласованного вращения механизма передвижения крана с рекуперацией энергии типа МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4. Метод сравнительной оценки СЭК с ЧРП принят для внедрения в «ГИПРОПРОМ» (г. Запорожье).

Рекомендации по использованию СЕК на постоянном токе приняты при модернизации кранов в цехе горячей прокатки ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье).

Ключевые слова: система, электропитание, частотно-регулируемый привод, активный выпрямитель, эффективность.

ABSTRACT

Nemikina O.V. Improving the efficiency of supply cranes with frequency-regulated drive. - Manuscript rights.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, on a speciality 05.09.03 - Electrotechnical complexes and systems. - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2016.

The work is devoted to improve the efficiency of power cranes with frequency-regulated drive by improved methods of analysis of the existing systems of power and the development of recommendations for cranes power system with frequency-regulated drive engineering. The method of choice power supply of cranes in based on comparative assessment power supply of DC and AC cranes with two-links frequency converters in frequency-regulated drive are developed. Analytical ratio of parameters of comparative assessment of the criteria such as calculated transformer power, cross-section and limit the length of the current lead by voltage loss and power losses in the current lead of the power supply of cranes is obtained. The advantage of the DC cranes power supply with frequency-regulated drive in analysis on all criteria are showed. Active rectifiers with dual conductivity are suggested for recuperation energy. New features of electromagnetic processes in power supply AC and DC cranes with frequency-regulated drive with help simulation are investigated. Proposal of improving the electromagnetic compatibility and power quality indicators for power supply AC and DC cranes with frequency-regulated drive are developed.

Keywords: system, power supply, frequency-regulated drive, active rectifier, efficiency.

Підписано до друку ____ . ____ . 2015 р. Формат 60x90/16.

Умовн. друк. арк. 1,2.

Тираж – 100 прим. Зам. № _____.

Надруковано з оригінал-макету в типографії
Запорізького національного технічного університету
69069, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64