

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

КОЗЛОВ Владислав Сергійович

УДК: 621.316.7

**СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОЇ КОРЕКЦІЇ
ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ
ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З КВАЗІСТАЦІОНАРНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ
2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Сінолиций Анатолій Пилипович**, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Ягуп Валерій Григорович**, професор кафедри електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук, доцент **Колб Андрій Антонович**, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії ДВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Захист відбудеться “___” _____ 2016 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19, тел. (0562) 472411).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою 49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий “___” _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Закон України «Про енергозбереження» серед основних принципів державної політики у сфері енергозбереження виділяє «пріоритетність вимог енергозбереження при здійсненні господарської, управлінської або іншої діяльності, пов'язаної з транспортуванням енергетичних ресурсів». Стосовно електричної компоненти корекція складових повної потужності мережі є найбільш вагомою складовою зазначеної вище концепції.

Виходячи із засад комплексної державної програми енергозбереження України в галузі електричних мереж, що передбачає раціоналізацію побудови схеми електромереж, доцільно зауважити про необхідність оптимізації систем активної корекції складових повної потужності мережі, які є невід'ємною складовою сучасної електричної мережі. Враховуючи сучасні вітчизняні та закордонні розробки в сфері корекції енергетичних процесів мережі живлення під час вибору компенсаторів слід приділити увагу таким сучасним технічним рішенням, як активні фільтри.

Існує низка розроблених класичних методів керування активними фільтрами, які мають певні недоліки при роботі в мережі зі спотвореною несиметричною напругою. Інші більш розгалужені способи керування активними фільтрами є достатньо складними в аспекті технічної реалізації. Способи керування активним фільтром, які ґрунтуються на багатокритеріальному оптимальному керуванні силовою частиною інвертору, мають недоліки, що пов'язані зі швидкістю обчислення оптимальної точки роботи в реальному масштабі часу.

Таким чином, наукова задача дисертаційної роботи полягає в поліпшенні показників якості електричної енергії мережі шляхом встановлення закономірностей впливу зміни параметрів силової частини активного фільтру на електромережу з квазістаціонарним характером зміни навантаження. Поставлена задача є актуальною і потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими і виробничими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетному напряму розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (Закон України від 11.07.2001 № 2623-III) і виконувалась згідно договорів про науково-технічну співпрацю «Розробка вимірювально-діагностичного комплексу електрофізичних величин» (№ ДР 0114U003905), «Розробка екологічно чистих ресурсоенергозберігаючих електротехнічних систем» (№ ДР 0114U003906), де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є поліпшення показників якості електроенергії системи живлення електроприводів шляхом

підвищення ефективності роботи систем активної корекції параметрів електромережі.

Для досягнення мети дисертаційної роботи були поставлені та сформульовані наступні наукові завдання досліджень:

–аналіз та виділення недоліків існуючих методів і способів оцінки параметрів електромережі, що використовуються в системах керування сучасними активними фільтрами;

–встановлення закономірності впливу зміни параметрів силових компонентів активних фільтрів на електромережу;

–удосконалення методів оцінки ефективності від впровадження активних фільтрів до енергетичного об'єкту;

–синтез та адаптація цифрової системи керування активним фільтром для використання в мережі із сучасними пристроями комерційного енергообліку;

–визначення області застосування розробленого методу побудови системи керування активним фільтром;

–виявлення недоліків та вдосконалення математичної моделі структури «електромережа – активний фільтр – навантаження».

Об'єкт дослідження – енергообмінні процеси в електромережах.

Предмет дослідження – методи розрахунку та способи корекції процесів енергообміну в електричних мережах на основі активних фільтрів.

Методи дослідження:

– *теоретичні*: методи синтезу регуляторів теорії автоматичного керування для синтезу регулятора напруги ланки постійного струму; методи оптимального керування процесами для синтезу екстремального регулятора; методи теорії електричних кіл для побудови схем заміщення активного фільтру; методи апроксимації функції для обробки отриманих даних; методи цифрової фільтрації сигналів для цифрової системи керування; методи частотного аналізу неперервних та дискретних сигналів для синтезу цифрової системи керування;

– *емпіричні*: фізичне та математичне моделювання – з метою визначення особливостей роботи активного фільтра в електромережі із погіршеними показниками якості; експериментальна перевірка ефективності розробленого способу керування активним фільтром.

Наукові положення:

– мінімізація цільової функції, що містить визначені гармоніки струму за умови формування активним фільтром струму синусоїдної форми, який знаходиться у фазі із напругою мережі, забезпечує найкращий результат роботи системи активної корекції;

– синтез структури системи керування активним фільтром, що ґрунтується на регулюванні розрахункового значення суми активної потужності мережі та

втрат електричної енергії у компенсаторі, дозволяє знизити вартість установки шляхом спрощення системи вимірювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

– *вперше* встановлено екстремальний характер цільової функції, що містить вибірккові вищі гармоніки мережі за умови формування активним фільтром синусоїдного струму у фазі із напругою та показано зв'язок цієї функції із показниками якості електроенергії;

– *вперше* розроблено метод керування системою активної корекції, що, на відміну від відомого, дозволяє виключити вплив похибки визначення рівня активної потужності шляхом мінімізації цільової функції системи екстремального регулювання;

– *вперше* теоретично обґрунтовано наявність режимів роботи електричної мережі, в яких неможливо застосування певних типів лічильників реактивної енергії для обчислення фактичного коефіцієнту потужності;

– *удосконалено* метод оцінки ефективності впровадження систем активної корекції параметрів електромережі, в якому, на відміну від відомих, використано нові ненормовані стандартами показники якості електроенергії.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується коректністю постановки теми та вирішуваних теоретичних завдань; обґрунтованістю прийнятих допущень; адекватністю розроблених математичних моделей відповідних реальних процесів на рівні до 10%; фізичним моделюванням енергетичних процесів системи «мережа - активний фільтр - навантаження».

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено методикку оцінки ефективності впровадження активних фільтрів до енергетичного об'єкту за допомогою пристроїв комерційного енергообліку, яка, на відміну від відомої, враховує особливості математичного апарату обчислення реактивної енергії лічильником;

– доведено необхідність застосування методів екстремального регулювання для обчислення в реальному масштабі часу оптимальної ширини струмового коридору та індуктивності реакторів активного фільтру;

– розроблено вимоги до цифрових систем керування компенсаторами та визначено оптимальну частоту дискретизації сигналу за критеріями витрат часу та точності подальшого обчислення, яка дорівнює 256 вибірок за період 0,02 с (12,8 кГц);

– запропоновано структуру цифрової системи керування активним фільтром, яка, на відміну від відомих, ґрунтується на асинхронних відносно до мережі алгоритмах вимірювання електричних величин та алгоритмах керування силовою частиною коректора.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики побудови цифрових систем вимірювання та керування, конструкторської документації та результатів експериментів, проведених із системами активної корекції показників якості електроенергії передано ПАТ «Електро завод» та ТОВ «Електроальянс» (м. Кривий Ріг) та використано при створенні лабораторного комплексу в ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних задач досліджень, пошуку, обробці та аналізі інформації щодо корекції показників якості електричної мережі, синтезі способу керування активним фільтром струму на основі екстремального регулювання параметрів коректора, удосконалення методики оцінки впровадження активних фільтрів на енергетичні об'єкти, вдосконалення цифрової системи керування активними фільтрами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові й практичні результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (м. Кривий Ріг, 2012 р.); «Проблеми автоматизованого електропривода» (м. Одеса, 2014 р.); «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2014 р. та 2015 р.); наукових семінарах кафедри автоматизованого електроприводу Запорізького національного технічного університету, кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет», кафедри електропривода ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ).

Публікації. Основні наукові результати опубліковані в 14 друкованих наукових працях (9 фахових видань та 4 тез конференцій), з них 1 видання з високим індексом цитування (Index Copernicus) та 1 закордонне видання.

Обсяг і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 200 сторінок, з них 171 сторінка – основний текст, 79 – ілюстрації по тексту, 26 таблиць по тексту, 123 – найменування використаної літератури, 8 додатків, викладених на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, наукова новизна та практична цінність роботи, зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими програмами і планами, викладено аналіз проблем, сформульовані мета і наукові завдання, які вирішувалися для досягнення мети.

У першому розділі наведено аналіз сучасних методів і способів оцінки та корекції складових повної потужності промислової мережі живлення. В розділі

проаналізовано роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, які зробили вагомий внесок в галузь контролю та корекції показників якості електроенергії: О.В. Волков, Р. Дрехслер, А.П. Сінолиций, Є.І. Сокол, В.Е. Тонкаль, В.Г. Ягуп, Н. Akagi, С. Budeanu, L. Czarnecki, S. Fryze, P. Zakikhani ...

Показано, що традиційні методи аналізу не дозволяють побудувати ефективні пристрої гнучкої корекції енергопоказників на відміну від сучасних «теорій потужності». Наприклад, класичний коефіцієнт потужності («косинус фі»), на відміну від одного із варіантів нетрадиційного коефіцієнту потужності (1), не несе інформацію про несиметрію та наявність вищих гармонік напруги та струму мережі.

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + S_b^2 + (3 \cdot n + 1) \cdot S_0^2 + D^2}}, \quad (1)$$

де λ - нетрадиційний коефіцієнт потужності; S_b - потужність пульсацій, що викликана несиметрією споживання; S_0 - прихована потужність, викликана невірноваженістю споживання; D - потужність спотворення, викликана дією вищих гармонік струмів.

В розділі проаналізовано способи керування активними фільтрами, які працюють в часовому базисі та засновані на перетворенні координат трифазної системи до інших площинних, та просторових систем (А-В-С, α - β , d-q, α - β -0, p-q-r тощо).

Встановлено, що різноманіття стратегій керування для активного фільтра (видалення вищих гармонік, компенсація реактивної потужності тощо) багато в чому залежить не тільки від топології пристрою, але й від способу аналізу електромережі, який закладено в цифрову систему керування. Наприклад, метод Фрізе та «p-q теорію» неможливо застосовувати для компенсації вибіркового гармонік струму (напруги).

В ході аналізу світових та вітчизняних розробок виділено напрямки розвитку активних фільтрів.

У другому розділі наведені основні методи та критерії оцінки ефективності впровадження активних фільтрів до енергетичних об'єктів. Оцінка ефективності може проводитися, засновуючись на:

- зміні загальних енергетичних показників (реактивна потужність, діючі значення струмів тощо);
- зміні показань приладів комерційного обліку електроенергії;
- зменшення втрат активної потужності (ККД тощо) мережі у порівнянні із активними втратами пристрою корекції;
- покращенні показників якості електроенергії та введенні останніх у межі прийнятих стандартів якості.

В розділі визначено обставини та розкрито сутність процесу зменшення показань лічильника реактивної енергії при компенсації вищих гармонік струму мережі за умови використання визначених типів електричних лічильників.

Для виявлення найбільш вагомій складовій, яка впливає на втрати коректора, наведено методику та виконано аналіз споживання потужності компонентами активного фільтру. Результати проведеного аналізу наведено на рис. 1:

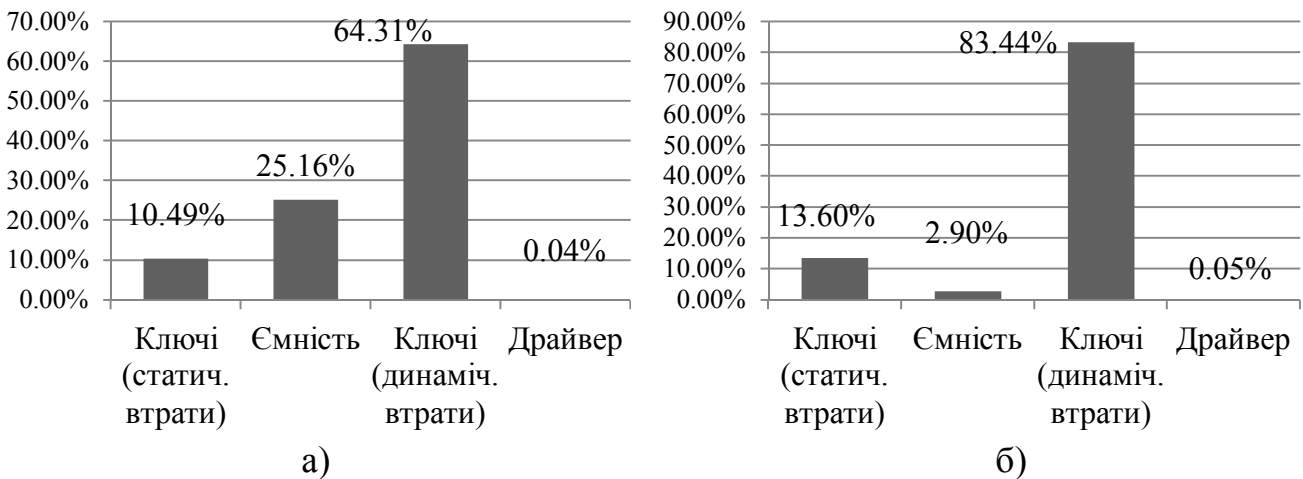


Рис. 1. Діаграма розподілу втрат в активній частині активного фільтру з ємністю на основі електроліту (а) та ємністю на основі поліпропілену (б)

До рис. 1 необхідно зазначити, що складова, обумовлена втратами у ємності, значною мірою залежить від типу конденсаторів.

Відсоток втрат пристрою відносно навантаження в зазначеному прикладі становить для активного фільтру з електролітичною ємністю $\approx 1,3\%$ та для фільтру з FILM (поліпропіленової) ємністю $\approx 0,8\%$.

На рис. 2. наведено ціновий розподіл складових активного фільтру встановленою потужністю ≈ 70 кВА.

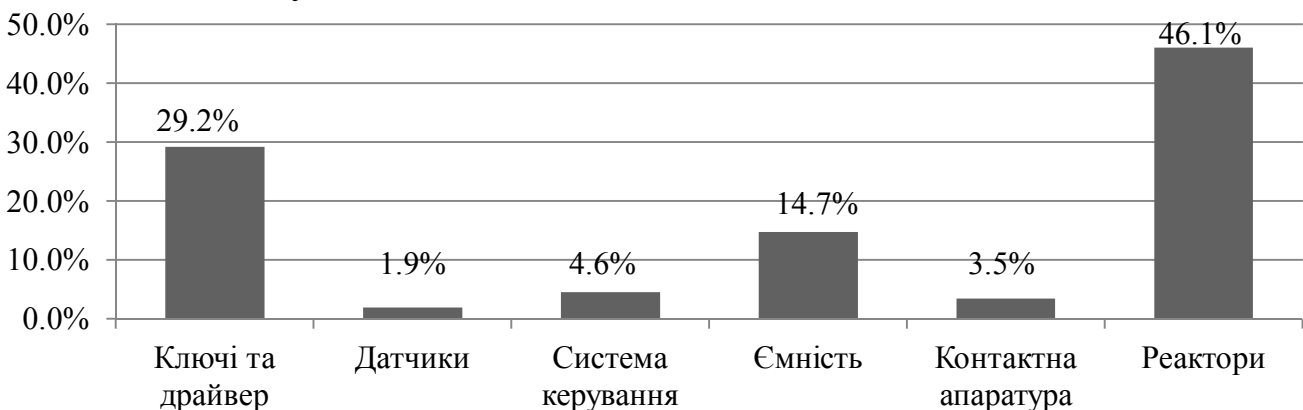


Рис. 2. Ціновий розподіл окремих компонентів активного фільтру

Із вищенаведених діаграм зроблено наступні висновки:

– використання FILM конденсаторів є більш доцільним через малий еквівалентний послідовний опір;

– можливим підвищенням вартості конденсаторної батареї коректора при її заміні на конденсатори більшої напруги можна нехтувати.

У розділі також наведено математичний апарат для оцінки впливу активного фільтру на мережу живлення, який включає як класичні так і ненормовані стандартами показники. Серед останніх слід виділити сумарні коефіцієнти гармонік напруги, струму, сумарний коефіцієнт потужності та зсуву, миттєвий коефіцієнт потужності (табл. 1).

Таблиця 1

Ненормовані стандартами показники якості електроенергії

| Показник якості електроенергії | Математичний вираз |
|--------------------------------------|--|
| Сумарний коефіцієнт потужності | $K_{p\Sigma} = \frac{P_{M(A)} + P_{M(B)} + P_{M(C)}}{S_{M(A)} + S_{M(B)} + S_{M(C)}}$ |
| Сумарний коефіцієнт гармонік напруги | $K_{G\Sigma U} = \frac{\sqrt{U_{M(A)}^2 - U_{(A)}^{(1)2} + U_{M(B)}^2 - U_{(B)}^{(1)2} + U_{M(C)}^2 - U_{(C)}^{(1)2}}}{\sqrt{U_{(A)}^{(1)2} + U_{(B)}^{(1)2} + U_{(C)}^{(1)2}}}$ |
| Сумарний коефіцієнт зсуву | $K_{\Sigma z} = \frac{P_{M(A)} + P_{M(B)} + P_{M(C)}}{S_{M(1)(A)} + S_{M(1)(B)} + S_{M(1)(C)}}$ |

Третій розділ присвячено синтезу нової системи керування активним фільтром. В розділі сформульовано основні вимоги, які висувають до способу виділення сигналу корекції. Використовуючи вищезгадані критерії виконано аналіз низки сучасних методів визначення струму корекції мережі. Перевагу надано IcosFi методу. Автором роботи запропоновано замінити вектори струму та напруги окремих фаз в оригінальному IcosFi методі на вектор струму та напруги першої гармоніки прямої послідовності (2) для можливості роботи пристрою в умовах несиметрії напруги (струму):

$$\begin{cases} i_{cA} = i_{NetA} - [I_{Load'}] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)}) \\ i_{cB} = i_{NetB} - [I_{Load'}] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{2\pi}{3}), \\ i_{cC} = i_{NetC} - [I_{Load'}] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{Load'} = I_{(1)}^{[Load]} \cdot \cos\left(\arg\left(\overline{U_{(1)}}\right) - \arg\left(I_{(1)}^{[Load]}\right)\right) + \Delta I_{Losses} + \Delta I_{Reg_Udc} \quad (3)$$

де i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} - миттєве значення струму завдання; i_{NetA} , i_{NetB} , i_{NetC} - миттєве значення струму мережі; $\varphi_{UNet}^{(1)}$, - кут зсуву фази вектора напруги першої

гармоніки прямої послідовності; $I_{(1)}^{[Load]}$ - амплітуда вектора струму першої гармоніки прямої послідовності струму навантаження; $\arg(\overline{U_{(1)}})$, $\arg(\overline{I_{(1)}^{[Load]}})$ - фази векторів напруги та струму навантаження першої гармоніки прямої послідовності; ΔI_{Losses} - активні втрати пристрою; ΔI_{Reg_Udc} - складова для регулювання напруги в ланці постійного струму фільтру.

В роботі показано, що запропонований метод (2) має обмеження застосування при роботі пристрою в мережі зі спотвореною напругою, винуватцем спотворення якої є енергогенеруюча організація. Однак, зазначене обмеження знімається при використанні нової системи керування.

Передумовами для синтезу нової системи керування, заснованої на методах оптимального керування, стали наступні факти:

– у ході практичних експериментів було виявлено, що при збільшенні напруги на ємності вище рівня $2,34 \cdot U_{фази}$ коефіцієнт гармонік (критерій якості) покращується, але при досягненні деякої точки (екстремуму), процес корекції сигналу мережі знову погіршується. Таким чином, існує деяка точка екстремуму, процес пояснює рис. 3.

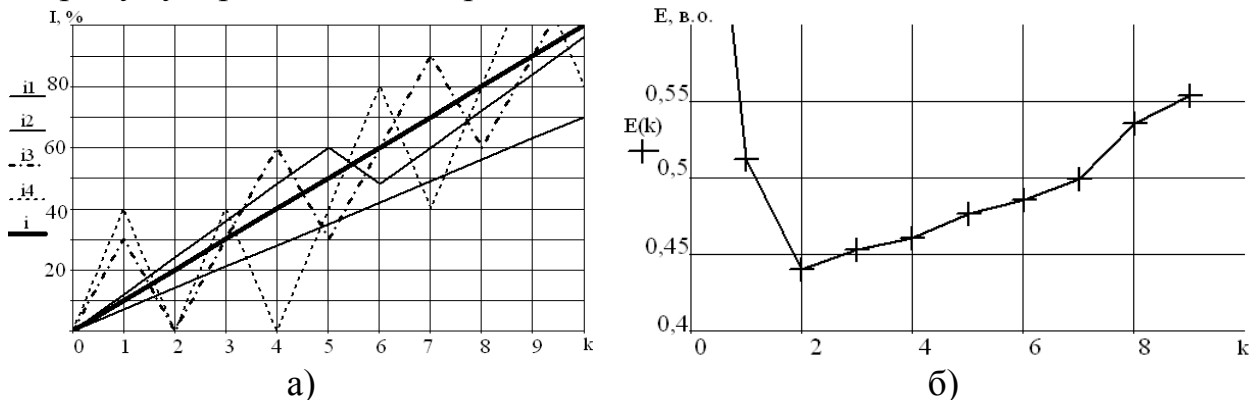


Рис. 3. Формування струму завдання різними за величиною похідної струмами активного фільтру (а) та залежність критерію якості від кількості комутацій (б)

– Рівнем напруги на ємності можна керувати без додаткових схемотехнічних заходів, використовуючи основний алгоритм виділення струму корекції.

Основна увага в роботі надається синтезу критерію якості для системи керування активним фільтром, математичний вираз якого наведено нижче.

$$J(i_{A,B,C}) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum I_{(n)}^2}{n}}, n = 3,5,7,33,35,53,55,73,75 \\ I_{(1)} \\ \arg(\overline{U_{(1)}}) - \arg(\overline{I_{(1)}}) \rightarrow 0 \end{cases} \rightarrow \min \quad (4)$$

де $J(i_{A,B,C})$ - цільова функція для обчислення критерію якості; $\overline{I_{(n)}}$ - вектор струму n -ної гармоніки; n - порядок гармоніки.

Екстремальний регулятор для цифрової системи керування створеної установки фізичного моделювання реалізовано шляхом використання методу важкої кульки із попереднім застосуванням фільтрації сигналу. Метод важкої кульки є продовженням методу градієнту та може бути описаний наступним рівнянням:

$$x^{n+1} = x^n - a \cdot f'(x^n) + \beta(x^n - x^{n-1}) \quad (5)$$

де x^n - амплітуда струму завдання $I_{(1)}^{[Load]}$ або складова для регулювання напруги завдання ΔI_{Reg_Udc} ланки постійного струму активного фільтру; $f'(x^n)$ - цільова функція; a та β - додатні коефіцієнти, які в загальному вигляді можуть бути змінними величинами ($a = var, \beta = var$).

Алгоритм для цифрової системи керування, заснований на методі важкої кульки, представлено на рис. 4.

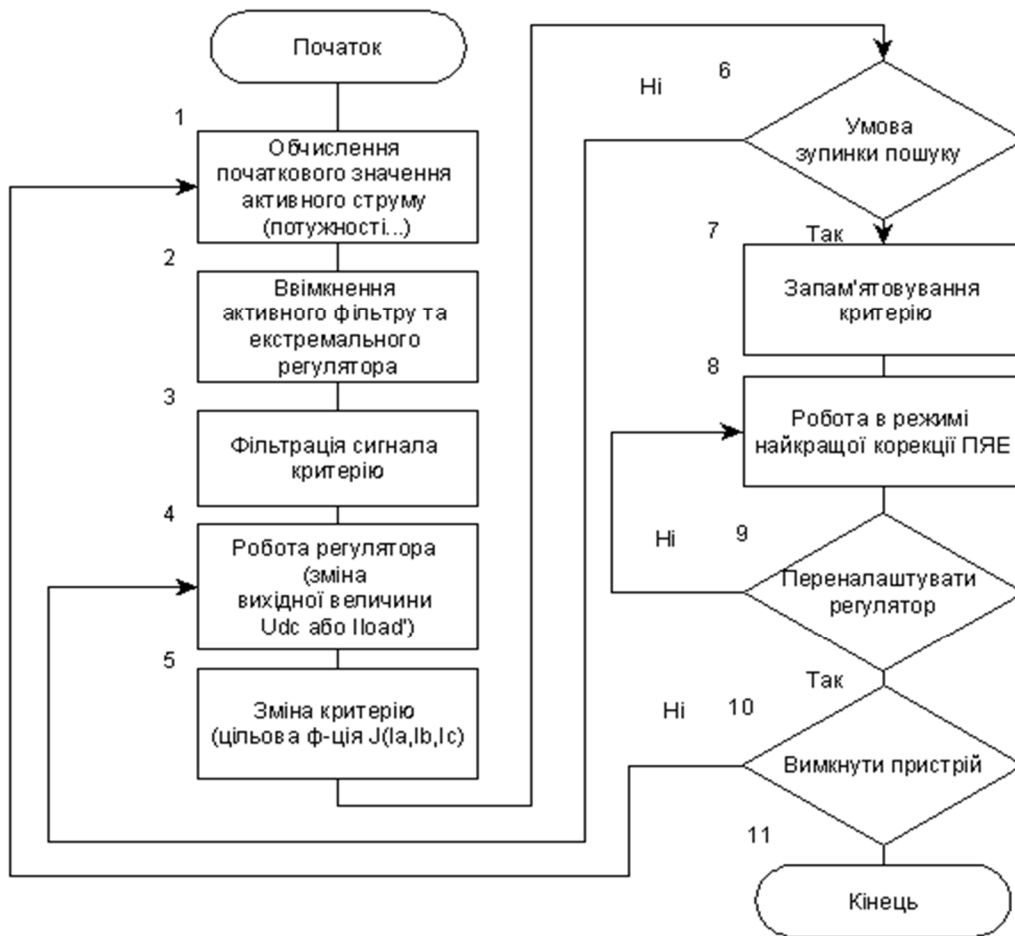


Рис. 4. Алгоритм цифрової системи керування

Цифрова система керування протягом одного періоду визначає рівень активної потужності навантаження та починає пошук оптимального значення

критерію якості із верхньої границі обчисленого попередньо значення $I_{(1)}^{[Load]}$ (3), яку пропонується обирати на рівні $1.2 I_{(1)}^{[Load]}$. Умовами зупинки пошуку можуть бути:

- досягнення екстремуму цільової функції: $Error^{[i-1]} - Error^{[i]} < K_{Stop}$;
- досягнення значення $(\Delta P_{Фільтру} \cdot (\Delta P_{Мережі})^{-1}) > 1$;
- досягнення фіксованого заздалегідь значення кількості кроків при проходженні екстремальної характеристики тощо.

На основі фізичних експериментів досягнуто швидкість налаштування активного фільтру на найкращий режим роботи за 0,6...0,8 с. Необхідно зазначити, що компенсація мережі при зміні параметрів навантаження останньої відбувається через один період напруги живлення (0,02 с). Вимоги динаміки накладають обмеження застосування запропонованого способу керування активними фільтрами на об'єктах промисловості.

У четвертому розділі виконано аналіз електромагнітних процесів силової частини активного фільтру. Наведено спрощену методику для вибору силових компонентів пристрою. Розкрито процес регулювання напруги в ланці постійного струму активного фільтру шляхом основного алгоритму.

Структурна схема запропонованої двоконтурної системи керування активним фільтром наведена на рис. 5.

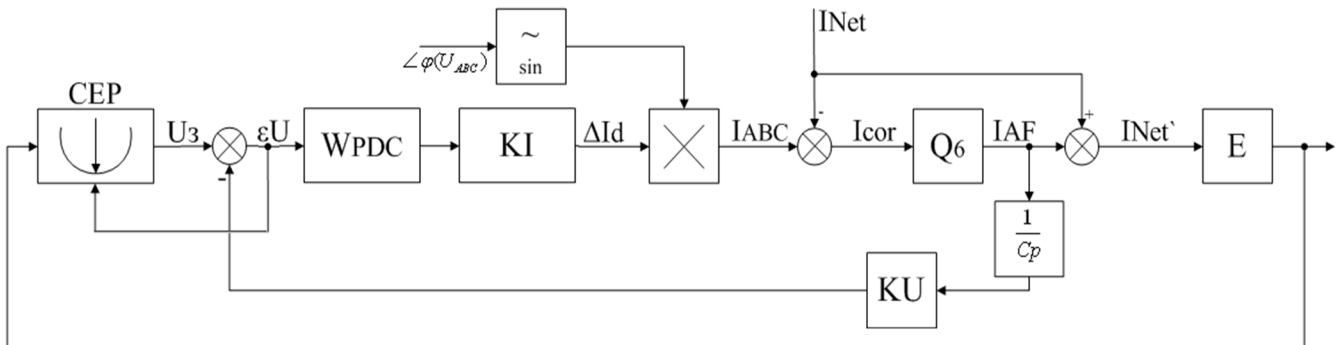


Рис. 5. Структурна схема запропонованої двоконтурної системи керування: CEP – система екстремального регулювання; U_3 – сигнал завдання; ε – похибка сигналу напруги; W_{PDC} – передатна функція регулятора; K_I – коефіцієнт для узгодження напруги завдання та струму; K_U – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою; Q_6 – блок силового інвертора; E – критерій оптимальності; I_{NET} , I_{ABC} , I_{COR} – сигнали струму мережі, завдання та корекції відповідно; I_{NET}' – сигнал струму мережі за минулий такт роботи цифрової системи керування; ΔId – розрахункове значення активного струму навантаження; C – ємність

конденсаторної батареї; $\angle\varphi(U_{ABC})$ – поточне значення кута вектора напруги першої гармоніки прямої послідовності.

Контур екстремального регулятора є зовнішнім у відношенні до контуру стабілізації напруги живлення. Після обчислення критерію якості екстремальний регулятор змінює завдання напруги на ємності. В свою чергу, регулятор напруги змінює розрахункове значення активної потужності мережі (активний струм), що призводить до зміни похідної струму корекції активного фільтру.

На основі попереднього аналізу в розділі запропоновано алгоритм для обчислення оптимальної індуктивності реактору.

Також в розділі розглянуто питання визначення оптимальної ширини смуги струмового коридору та впливу струмового коридору на кінцевий результат корекції.

У п'ятому розділі наведено основні економічні переваги нової системи керування активним фільтром, розглянуто технічні особливості синтезу цифрової системи керування коректором та подано результати моделювання системи «мережа - активний фільтр - навантаження».

Основні техніко-економічні переваги цифрової системи вимірювання активного фільтру полягають у: використанні спрощеного датчика фази вектора напруги мережі, який має значно вищу собівартість, ніж вимірювальні трансформатори напруги (працездатність обґрунтована в основній роботі); використанні 3 датчиків струму мережі замість 6 датчиків струму (у традиційному варіанті виконання вимірювальної частини коректора).

До особливостей створеної цифрової системи керування активного фільтру належать:

- асинхронна робота алгоритмів обчислення сигналу корекції, екстремального регулятора та алгоритму керування силовими ключами;
- адаптація цифрової системи для задачі технологічного контролю електричних параметрів мережі;
- застосування цілочисельної арифметики для обчислення основних математичних викладок з метою прискорення роботи цифрової системи керування.

Розроблено вимоги до цифрових систем керування коректорами та визначено оптимальну частоту дискретизації сигналу для зазначеного класу пристроїв, яка становить 256 вибірок за період 0,02 с (12,8 кГц).

Ефективність нової системи керування підтверджено експериментально на основі фізичного та математичного моделювання. У процесі дослідження

створено установку фізичного моделювання електромагнітних процесів мережі живлення (рис. 6).

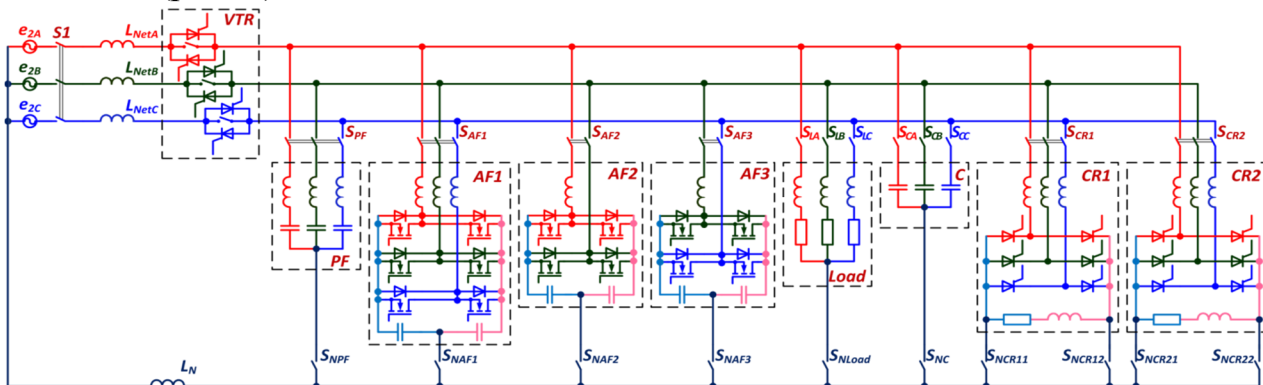


Рис. 6. Принципова схема силової частини установки фізичного моделювання

Результати фізичного моделювання електромагнітних процесів системи «мережа-активний фільтр-навантаження» наступні:

– при застосування активного фільтру для задачі компенсації несиметрії коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з 8,8% до 3,2%, що відповідає нормам ГОСТ 13109-97.

– при застосуванні активного фільтру для задачі компенсації вищих гармонік коефіцієнт потужності збільшено на $\approx 3\%$; коефіцієнт зсуву зменшено на $\approx 3\%$; коефіцієнт гармонік струму зменшено в 1,7 рази, коефіцієнт гармонік напруги збільшено на $\approx 4,3\%$.

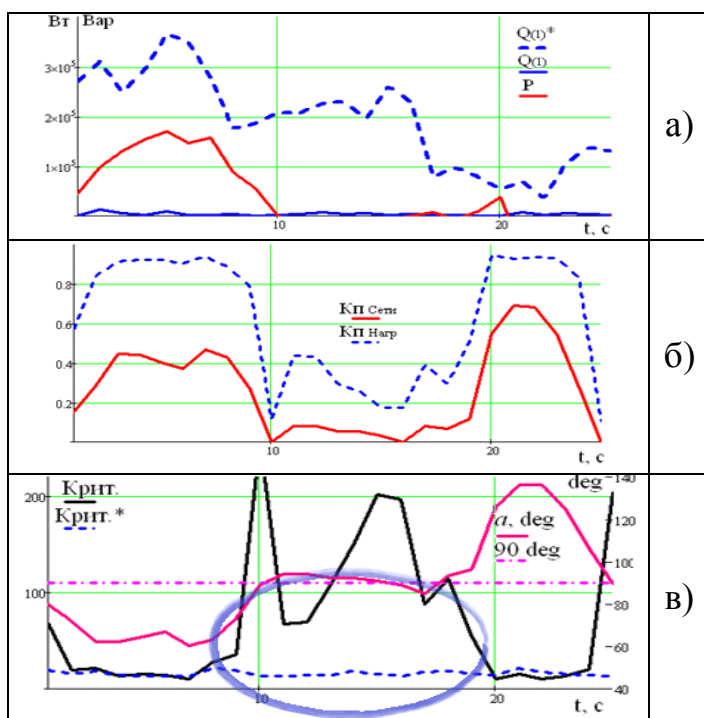


Рис. 7. Графіки зміни реактивної та активної потужностей (а), коефіцієнту потужності (б), та кореляції запропонованого критерію з вибірковими гармоніками та повним спектром гармонік (в)

– коефіцієнти потужності мережі та навантаження за цикл підвищено відповідно з 0,163 до 0,998;

– споживану реактивну енергію за цикл зменшено в 56 разів;

Також в розділі наведено результати математичного моделювання активного фільтру із новою системою керування для промислового об'єкту – екскаватора ЕКГ-5. Результати математичного моделювання наведено на рис. 7. Чисельні результати математичного моделювання наступні:

– значення коефіцієнту гармонік напруги за цикл коливається в діапазоні від 21% до 5,5%, коефіцієнт гармонік струму на більшому проміжку циклу роботи погіршується та коливається в межах від 18% до 400%;

– запропонований критерій для екстремального регулятора показує погану кореляцію впродовж циклу компенсації реактивної потужності, що є обмеженням застосування критерію.

Похибки між результатами фізичного експерименту та математичним моделюванням енергопроцесів, відтворених за допомогою установки фізичного моделювання наступні:

– похибка у визначенні коефіцієнту гармонік струму мережі до корекції становить $\approx 3\%$;

– похибка у визначенні коефіцієнту гармонік струму мережі після корекції активним фільтром із включеним екстремальним регулятором становить $\approx 12\%$;

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій вирішується актуальна наукова задача поліпшення показників якості електричної енергії мережі шляхом встановлення закономірностей впливу зміни параметрів силової частини активного фільтру на електромережу з квазістаціонарним характером зміни навантаження. Застосування екстремального регулювання в системі керування активним фільтром з урахуванням специфічних особливостей корекції показників якості електроенергії мережі живлення є певним внеском у розвиток теорії компенсації неактивних складових повної потужності та цифрових систем керування електротехнічними комплексами.

1. В роботі синтезовано новий інтегральний критерій, в основу якого покладено відшукану екстремальну залежність між зміною параметрів активного фільтру та процесом корекції показників якості електроенергії. Використання зазначеної залежності в системі керування активним фільтром струму дозволяє ввести коректор в найкращій режим роботи.

2. Розроблено метод керування системою активної корекції, що, на відміну від відомого, дозволяє виключити вплив похибки визначення рівня активної потужності шляхом мінімізації цільової функції системи екстремального регулювання.

3. Вдосконалено методики оцінки ефективності впровадження активного фільтру, серед яких слід зазначити наступні:

– методика на основі зміни показань лічильників активної та реактивної потужності. В процесі модернізації зазначеної методики теоретично обґрунтовано наявність режимів роботи електричної мережі, в яких неможливо

застосування певних типів лічильників реактивної енергії для обчислення фактичного коефіцієнту потужності;

– методика оцінки ефективності, в якій, на відміну від відомих, використано нові ненормовані стандартами показники якості електроенергії.

4. Проаналізовано співвідношення активних втрат та ціновий розподіл складових компонентів активного фільтру: найбільш вагомою складовою за втратами є складова динамічних втрат потужності в силових ключах (60%...80%). Найбільш коштовними компонентами є реактори активного фільтру ($\approx 45\%$). Встановлено, що можлива заміна конденсаторної батареї при застосуванні нового способу керування не призведе до підвищення ціни коректора.

5. Модернізовано IcosFi метод керування активним фільтром, який у сукупності із методами екстремального керування дозволяє виключити вплив похибки обчислення активної потужності за визначених умов.

6. Запропоновано систему екстремального керування параметрами активного фільтру, яка дає можливість:

– спростити систему виміру електричних величин активного фільтру шляхом зменшення кількості датчиків;

– досягти найкращого рівня компенсації за обраною стратегією корекції електромережі.

7. Доведено доцільність застосування методів екстремального керування для визначення в реальному масштабі часу оптимальної ширини струмового коридору та індуктивності реакторів коректора.

8. Отримано аналітичні залежності для вибору параметрів силової частини активного фільтру.

9. Синтезовано цифрову систему керування активним фільтром та запропоновано дискретні вирази для адаптації обчислення електрофізичних величин на базі мікропроцесорної техніки. Встановлено, що частота вибірки сигналу 12,8 кГц, яка відповідає 256 вимірам за період 0,02 с, є оптимальною за критеріями швидкості та точності.

10. Цифрова система керування дає можливість використовувати активний фільтр для організації технологічного контролю електричних параметрів мережі живлення. Особливістю цифрової системи є асинхронна робота алгоритмів обчислення електричних параметрів мережі та алгоритмів керування силовою частиною коректора.

11. Достовірність запропонованого методу керування активним фільтром перевірено експериментально на основі створеного стенду фізичного моделювання. Проведено дослід з компенсації несиметрії напруги, коефіцієнт несиметрії якої за зворотною послідовністю зменшено з 8,8% до 3,2%.

Коефіцієнт несиметрії струму зворотної послідовності зменшено з 32,7% до 3,4%.

12. Проведено математичне моделювання реального об'єкту (екскаватор ЕКГ-5), результати якого наступні: реактивну енергію за цикл зменшено в 56 разів; значення коефіцієнту гармонік напруги за цикл коливається в діапазоні від 21% до 5,5%, коефіцієнт гармонік струму на більшому проміжку циклу роботи екскаватора погіршується та коливається в межах від 18% до 400%; запропонований критерій для екстремального регулятора показує погану кореляцію впродовж часу, за якого відбувається компенсація виключно реактивної потужності, що є обмеженням застосування запропонованого критерію.

13. Практичні та теоретичні результати дисертаційної роботи були враховані при створенні нової лабораторної бази у вищому навчальному закладі ДВНЗ «Криворізький національний університет», а також рекомендуються для використання науково-дослідними та проектними організаціями, які займаються розробкою та впровадженням пристроїв активної корекції до промислових об'єктів. Рекомендації щодо впровадження активних фільтрів струму були надані ТОВ «Електроальянс» та ПАТ «Електро завод» (м. Кривий Ріг).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Закордонні видання:

1. Козлов В.С. Синтез математического аппарата управления активными фильтрами на основе р-q теории / В.С. Козлов, А.Ф. Синолицый, В.А. Кольсун // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - СПб.: СПбГПУ, 2014. - №1(190). - С. 54-60.

Фахові видання та видання, які включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Сінолицый А.П. Заходи модернізації р-q теорії миттєвої потужності для роботи в умовах несинусоїдної несиметричної системи напруг / А.П. Сінолицый, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Електротехніка і електромеханіка. - Х.: НТУ "ХПІ", 2013. - №5. - С. 65-69. (Index Copernicus)

3. Сінолицый А.П. Р-q теорія миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації. Обмеження застосування / А.П. Сінолицый, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Електротехніка і електроенергетика. - Запоріжжя.: ЗНТУ, 2013 - №2. - С. 34-39.

4. Козлов В.С. Особливості застосування активних фільтрів струму в сучасних автоматизованих системах контролю та обліку електроенергії / В.С. Козлов // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах.

Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип.1/2014(2).- С.237-239.

5. Лабораторний комплекс дослідження енергопотоків мережі живлення з різноманітними режимами навантаження / А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, О.О. Удовенко [та ін.] // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 37. – С. 161-165.

6. Сінолиций А.П. Ефективність використання активного фільтру струму з точки зору класичної системи енергообліку / А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 36. – С. 88-92.

7. Сінолиций А.П. Керування силовим активним фільтром струму в умовах несиметричної несинусоїдної напруги живлення / А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Вісник Криворізького національного університету. – 2014 – Вип. 35. – С. 181-185.

8. Сінолиций А.П. Екстремальний регулятор для силового активного фільтру струму / А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - К.: Техніка, 2014. - № 15 (91). - С. 375-378.

9. Омельченко О.В. Силовий активний фільтр із системою екстремального регулювання / О.В. Омельченко, В.С. Козлов // Вісник НТУ "ХПИ". - Харків: НТУ "ХПИ", 2015. - Вип. 12 (1121). - С.439-442.

10. Козлов В.С. / Аналіз втрат потужності силового активного фільтру / В.С. Козлов // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (3). – С.208-210.

Матеріали конференцій:

11. Сінолиций А.П. До питання вимірювання реактивної потужності сучасними лічильниками електричної енергії / А.П. Сінолиций, В.С. Козлов // Молодь: наука та інновації: матеріали наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. – Д.: Державний ВНЗ "НГУ", 2013. - С.381.

12. Козлов В.С. Особливості практичної реалізації інтелектуальної частини активного фільтру / В.С. Козлов // Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття : сб. тез доповідей всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих вчених, спеціалістів, аспірантів. – Маріуполь: ДВНЗ "ПГТУ", 2014. – С.43.

13. Козлов В.С. / Визначення робочого діапазону активних фільтрів струму / В.С. Козлов, Є.А. Гладченко // Міжнародна конференція "Сталий розвиток промисловості та суспільства". - Кривий Ріг, ДВНЗ "Криворізький національний університет". - 2014.- С. 179-180.

14. Козлов В.С. Критерії оцінки ефективності роботи активних фільтрів / В.С. Козлов, Д.В. Риженков // Матеріали конференції "Сталий розвиток промисловості та суспільства", Т1, ДВНЗ "КНУ", Кривий Ріг, 2015.-С. 250.

У роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належить: [10,13] вирішення проблем силової частини активного фільтру; [2,3,7,8,9,] аналіз недоліків та модернізація способів керування активними фільтрами; [4,6,11,14] – оцінка ефективності впровадження активних фільтрів; [5,6,12] - фізична реалізація прототипу активного фільтру.

АНОТАЦІЯ

Козлов В.С. Синтез систем активної корекції показників якості електроенергії електромережі для електроприводів з квазістаціонарними режимами роботи. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, Україна, 2016.

В дисертаційній роботі вирішена актуальна задача поліпшення показників якості електричної енергії мережі шляхом встановлення закономірностей впливу зміни параметрів силової частини активного фільтру на електромагнітні процеси мережі живлення з квазістаціонарним характером зміни навантаження.

Застосування методів екстремального регулювання в системі керування активним фільтром з урахуванням специфічних особливостей корекції показників якості електроенергії мережі живлення дозволяє покращити роботу коректора та спростити систему виміру. Запропонований в дисертації критерій оптимальності для екстремального регулятора та нова цифрова система керування дозволяють застосовувати пристрій для компенсації реактивної потужності, вищих гармонік струму та балансування струмів.

Працездатність нової синтезованої системи керування активним фільтром перевірено експериментально на основі фізичного моделювання: проведено дослід з компенсації несиметрії напруги, коефіцієнт несиметрії якої зменшено з 8,8% до 3,2%. В роботі також наведено результати математичного моделювання промислового об'єкту (екскаватор ЕКГ-5), серед яких слід виділити наступні: реактивну енергію за цикл зменшено в 56 разів; значення коефіцієнту гармонік напруги за цикл коливається в діапазоні від 21% до 5,5%; коефіцієнт гармонік струму на більшому проміжку циклу роботи екскаватора погіршується та коливається в межах від 18% до 400%.

Цифрова система керування активним фільтром адаптована для використання коректора в системах технологічного контролю електричних параметрів.

Ключові слова: активний фільтр, коефіцієнт потужності, енергозбереження, екстремальний регулятор, вищі гармоніки.

АННОТАЦИЯ

Козлов В.С. Синтез систем активной коррекции показателей качества электроэнергии электросети для электроприводов с квазистационарными режимами работы. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы». Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, Украина, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная задача улучшения показателей качества электроэнергии сети питания путём выявления закономерностей изменения параметров силовой части активного фильтра на электромагнитные процессы в сети питания с квазистационарным характером изменения нагрузки. Предложенный способ синтеза системы экстремального регулирования является универсальным и может быть интегрирован в большинство современных способов управления системами активной коррекции. Применение способов экстремального регулирования в системе управления активным фильтром с учетом специфических особенностей коррекции энергопотоков электросети позволяет повысить качество коррекции и упростить систему измерения. Предложенный в диссертации критерий оптимальности и новая цифровая система управления позволяют применять устройство для компенсации реактивной мощности, высших гармоник тока и балансировки токов.

В работе также уделено внимание оценке эффективности применения компенсаторов показателей качества электроэнергии на промышленных объектах. В результате анализа математического аппарата приборов коммерческого учёта электроэнергии обоснована возможность функционирования электрической сети в режимах, при которых невозможно применение определённых типов счётчиков реактивной энергии для вычисления фактического коэффициента мощности. Работа содержит математические выкладки для вычисления ненормируемых стандартами показателей качества электроэнергии, которые позволяют произвести более детальный анализ электромагнитных процессов, протекающих в сети питания. В ходе анализа электромагнитных процессов, протекающих в активном фильтре, раскрыта суть способа регулирования напряжения в звене постоянного тока корректора, применяя который нет необходимости в использовании дополнительных схемных решений. Также внимание уделено особенностям применения токового коридора в системах управления активными фильтрами.

Значительное внимание уделено разработке и синтезу цифровой системы управления активным фильтром, результатом которой является созданная

установка физического моделирования энергетических процессов сети питания. Работоспособность предложенной системы управления активным фильтром проверена экспериментально на основе физического моделирования: проведен опыт по компенсации несимметрии напряжения, коэффициент несимметрии которого уменьшен с 8,8% до 3,2%.

В диссертации также приведены результаты математического моделирования промышленного объекта (экскаватор ЭКГ-5), среди которых следует выделить следующие: реактивная энергия за цикл уменьшена в 56 раз; значение коэффициента гармоник напряжения за цикл колеблется в диапазоне от 21% до 5,5%; коэффициент гармоник тока на большем промежутке цикла работы экскаватора ухудшается и колеблется в пределах от 18% до 400%.

Ключевые слова: активный фильтр, коэффициент мощности, энергосбережение, экстремальный регулятор, высшие гармоники.

ANNOTATION

Kozlov V.S. Synthesis of active power filter systems for electric load with quasi-stationary work regimes. – On the right of manuscript.

Philosophy Doctor Thesis on specialty 05.09.03 – “Electrical complexes and systems”. SHEE "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine, 2016.

In the thesis the actual problem of improving of the active power filters efficiency is solved. The main idea of modernization of active filter control system is to use the found extremum relation between changing of power inverter parameters and the process of power quality correction. The area of applying of modernized active power filter is network with slowly changing loads.

The application of proposed extremum seeking control based on found physical relation can improve the quality of correction of electric energy flow and simplify the active power filter measurement system. The tasks which can be solved with help of active power filter based on proposed new control system are: reactive power compensation, THD level reduction, balancing of load, technological control of electric parameters.

The thesis is also involves the questions of efficiency determining of active filters which work at industrial objects. The particular attention is given to using of electric meter systems for evaluation of correction process efficiency.

The operability of active power filter with proposed new control system is estimated experimentally with help of physical modeling: it was conducted the experiment of reducing voltage unbalance (reduced from 8.8% to 3.2%). Also it was conducted the mathematical modeling of real industry object (excavator EKG5). It would be noted the next results: the reactive energy by cycle is reduced by 56 times,

voltage THD level changes in borders from 5.5% to 21%, current THD level changes from 18% to 400% during most part of cycle.

Digital control system of proposed active power filter is adopted for tasks of technological control of electric parameters.

Keywords: active filter, power factor, energy saving technology, extremum-seeking regulator, THD.

КОЗЛОВ Владислав Сергійович

**СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОЇ КОРЕКЦІЇ
ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З КВАЗІСТАЦІОНАРНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ**

(Автореферат)

Підписано до друку 18.02.2016
Формат 60x90/24. Папір офсетний.
Об'єм 0,9 ум. друк. арк., 1.02 обл.-вид. арк.
Тираж 100 прим. Замовлення № 12.01.2016

Видавничий центр ДВНЗ «КНУ»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №4328 від 24.05.2012 р.
50027, м. Кривий Ріг, вул. XXII Партз'їзду, 11.

