

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Бедерак Ярослав Семенович

УДК 621.316.176

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# **ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Я.С. Бедерак

Науковий керівник  
Волошко Анатолій Васильович,  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

## АНОТАЦІЯ

**Бедерак Я.С.** Оптимізація перетікань реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств з урахуванням якості електроенергії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

У дисертаційній роботі розроблено метод розрахунку фактичних значень перетікань реактивної потужності в системі електропостачання промислових підприємств з різнохарактерним навантаженням шляхом застосування інформаційної бази автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах, коли межа балансової належності знаходиться на стороні вищої напруги силових трансформаторів, а розрахункові прилади обліку встановлені на стороні нижчої напруги. Доведено, що реальні значення втрат енергії в силових трансформаторах залежать від характеру навантаження. Удосконалено метод розрахунку усталеного режиму роботи конденсаторної установки при наявності джерел вищих гармонік шляхом визначення резонансної частоти та побудови залежності модулю імпедансу від номера вищої гармоніки в мережі для запобігання резонансу струмів на непарних вищих гармоніках, кратних 50 Гц. Визначена кількість працюючих асинхронних електродвигунів в групі однотипних в режимі реального часу, що необхідно для складання схеми заміщення мережі та проведення подальших розрахунків несинусоїдального режиму роботи мережі.

Розроблено засоби і заходи, що виключають виникнення резонансних явищ в системі електропостачання, де є працюючі конденсаторні установки, під час пуску нелінійного навантаження. Удосконалено методику проведення статистичного аналізу даних активних і реактивних електричних навантажень в частині визначення умов отримання інтервалів стаціонарності і організації роботи аналізу даних в режимі реального часу.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в такому:

- вперше розроблено метод розрахунку перетікань РП у СЕП з різнохарактерним навантаженням при відсутності збігу номінальної напруги на межі балансової належності та місцях встановлення приладів обліку, який ґрунтується на визначенні відносних  $n$ - хвилинних значень активної та реактивної потужності;
- отримав подальший розвиток метод розрахунку режиму роботи мережі з КУ, підключеної паралельно активно-індуктивному навантаженню при наявності джерел ВГ, який полягає в визначенні імпедансу та резонансної частоти в режимі реального часу;
- удосконалено метод визначення еквівалентного індуктивного опору асинхронних електродвигунів (АД) в режимі реального часу за рахунок обробки даних систем обліку електроенергії;
- отримав подальший розвиток метод проведення статистичного аналізу електричних навантажень в режимі реального часу, який базується на визначенні умов одержання їх інтервалів стаціонарності.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у підвищенні енергоефективності роботи пристроїв компенсації РП та розробці заходів з уникання резонансних явищ у СЕП з компенсуючими пристроями напругою 10 (6) кВ. Розроблена методика розрахунку перетікань РП для випадку відсутності напруги на межі балансової належності та місцях підключення приладів розрахункового обліку електроенергії використана для створення програми у складі АСКОЕ ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), яка застосовується з 2007 року для комерційних розрахунків за перетікання РП між ПАТ «АЗОТ» та ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси). Удосконалена в дисертаційній роботі послідовність статистичного аналізу даних ЕН застосовується при виконанні проектів реконструкції промислових підприємств проектним інститутом ТОВ «Промелектропроект» (м. Київ). Результати дисертаційної роботи використані для розробки спеціального програмного забезпечення, що застосовується ТОВ «ТЕССА» м. Харків при проведенні обстеження електроприймачів промислових підприємств.

**Ключові слова:** системи електропостачання, якість електричної енергії, реактивна потужність, вищі гармоніки, конденсаторні установки.

### Список основних публікацій здобувача

1. Бедерак Я. С. Методы проверки схем включения счетчиков и измерительных каналов систем учета электроэнергии: Монография / Я. С. Бедерак, А. В. Волошко, Ю. А. Родин, А. В. Праховник. – Харьков: Изд-во «Форт», 2012. – 136 с.

2. Волошко А. В. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. М. Лутчин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харків. – 2013. – Вип. 5/8 (65). – С. 19–23.

3. Волошко А. В. Комбинированный метод восстановления учетных данных электропотребления на химических предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Лутчин Т. Н. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. – 2013. – № 2. – С. 38–43.

4. Бедерак Я. С. Дослідження режиму роботи конденсаторних установок 6 (10) кВ, підключених до вітки зведеного струмообмежувального реактора / Я. С. Бедерак, С. В. Олейнік, А. А. Шуляк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчуг. – 2013. – Вип. 2 (22). Частина 2. – С. 290–294.

5. Бедерак Я. С. Применение метода экспоненциального сглаживания для восстановления утерянных данных технического учета на промышленных предприятиях / Я. С. Бедерак // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2014. – №4. – С. 52–55.

6. Волошко А. В. Система моніторингу режимів електроспоживання промислового підприємства / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. : НТУУ «КПІ» – 2014. – № 4. – С. 50 – 58.

7. Стеценко И. В. Восстановление и оперативное прогнозирование методом Хольта электропотребления предприятий с непрерывным циклом работы

/ И. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Электронное моделирование. – К. – 2015. – Т. 37 (№4). – С. 119–126.

8. Волошко А. В. Оперативное прогнозирование электропотребления предприятий с непрерывным циклом работы / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин // Электронное моделирование. – К. – 2015. – Т. 37 (№6). – С. 111 – 118.

9. Gapon D. A. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises / D. A. Gapon, Ya.S. Bederak // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2016. – №1. – С. 56–58.

10. Волошко А. В. Метод автоматичного визначення кількості одночасно працюючих в групі електродвигунів / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ» – 2016. – №5. – С. 61–63.

11. Находов В. Ф. Застосування методів самоорганізації математичних моделей енергоспоживання для встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харків. – 2012. – №5. – С. 23–33.

12. Стеценко И. В. Побудова багатофакторних математичних моделей енергоспоживання на хімічному виробництві. / І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харків. – 2013. – №7. – С. 41–48.

13. Бедерак Я. С. Електромагнітна сумісність складноструктурованих електропостачальних систем промислових підприємств / Я. С. Бедерак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – №12. – С. 290–294.

14. Гапон Д. А. Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей / Д. А. Гапон, Я. С. Бедерак // Промышленная энергетика. – М. – 2014. – №2. – С. 27–30.

15. Волошко А. В. К вопросу восстановления учетных данных на химических предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю.

Кудрицкий // Известия Томского политехнического университета. – Томск. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 101–107.

16. Волошко А. В. Восстановление учетных данных энергопотребления на промышленных предприятиях / А. В. Волошко, Т. Н. Лутчин, Я. С. Бедерак, А. В. Ткаченко // Материалы VII Международной научно-практической конф. «Техника и технология: новые перспективы развития», 26 ноября 2012 г. – Москва, 2012. – С. 179–188.

17. Стеценко И. В. Побудова багатofакторних математичних моделей енергоспоживання на хімічному виробництві / І. В. Стеценко, Я. С. Бедерак // Обчислювальний інтелект-2013 (результати, проблеми, перспективи): 2-а Міжнародна науково-технічна конф., 14-17 травня 2013 р.: тези доп. – Черкаси.– 2013. – С. 427–428.

18. Бедерак Я. С. Влияние объема выборки данных электропотребления на ошибку математической модели / Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю. Кудрицкий // Международный научно-исследовательский журнал (Сборник по результатам XXII Заочной научно-практической конференции Research Journal of International Studies, 2013 г.). – Екатеринбург. – 2014. – № 1. – С. 37–40.

19. Бедерак Я. С. Алгоритм програми захисту конденсаторних установок 10 (6) кВ в електроустановках промислових підприємств від резонансу струму / Я. С. Бедерак // Техника и технология. Обсуждения современной науки «Inżynieria i technologia. Priorytetowe obszary badawcze: od teorii do praktyki», 30.05.2016 – 31.05.2016, Lublin. – 2016. – С. 86–91.

20. Волошко А. В. Сравнительный анализ методов расчета потерь активной электроэнергии в силовых трансформаторах / А. В. Волошко, М. Д. Банин, Я. С. Бедерак // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб. // Промелектро. – К. – 2010. – №6. – С. 36–41.

21. Денисенко М. А. Дослідження електричних навантажень насосної станції / М. А. Денисенко, Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2012. – №4. – С. 3–11.

22. Денисенко М. А. Дослідження закону розподілу та нормованих автокореляційних функцій насосної станції / М. А. Денисенко, Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2012. – №10. – С. 62–65.

23. Банин Д. Б. Расчет реальной величины перетока реактивной электроэнергии для промышленных предприятий на основе данных АСКУЭ / Д. Б. Банин, М. Д. Банин, А. В. Дегтярев, Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – 2013. – К. – №9. – С. 16–21.

24. Бедерак Я. С. Необхідність впровадження моніторингу струму та напруги з різним характером навантаження в гілках здвоєних реакторів при наявності джерел вищих гармонік / Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2013. – №8. – С. 48–51.

25. Волошко А. В. Усовершенствование методов восстановления учетных данных энергопотребления на промышленных предприятиях / А. В. Волошко, Я. С. Бедерак, Т. Н. Лутчин, М. Ю. Кудрицкий // Енергетика та електрифікація. – К. – 2014. – №7. – С. 28–30.

26. Бедерак Я. С. Засоби захисту конденсаторних установок 10 (6) кВ, встановлених в одній вітці здвоєного струмообмежувального реактора, у випадку наявності підключеного до другої вітки джерела вищих гармонік, від резонансу струмів / Я. С. Бедерак // Енергетика і електрифікація. – К. – 2014. – №6. – С. 34–37.

27. Бедерак Я. С. Про верифікацію вимірювальної інформації в автоматизованих системах технічного обліку електроенергії / Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – К. – 2014. – №11. – С. 34–35.

28. Бедерак Я. С. Шляхи зменшення оплати за спожиту електроенергію на промислових підприємствах, де розрахункові лічильники знаходяться нижче межі балансової належності з енергопостачальною організацією / Я. С. Бедерак // Енергетика та електрифікація. – К. – 2015. – № 3. – С. 10–16.

## ABSTRACT

**Bederak Ya.S.** Optimization of reactive power flows in power supply systems of industrial enterprises taking into account the quality of electricity. – Manuscript.

The thesis is for obtaining scientific degree candidate of technical sciences in specialty 05.14.02 - Electrical power stations, networks and systems. National Technical University of Ukraine "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2017.

The method of calculating the actual values of reactive power flows in power systems of industrial enterprises with varied load was developed in the thesis. This was done by applying the database of automated accounting systems of electric power under conditions, when the balance limit is on the side of high voltage of power transformers and computational metering devices are installed on the side of low voltage. Criteria of reactive power flows optimization for each reactive power source and their combinations were developed.

The method of calculating the established operating mode of capacitor bank with the source of higher harmonics was improved by determination the resonant frequency and creation dependence of the impedance absolute value on the number of higher harmonics in the network in order to prevent resonance of currents at higher odd harmonics that are multiples of 50 Hz. The number of working asynchronous electric motors in the group of the same type in real time was determined.

Tools and actions which exclude resonance emergence in the power supply system, with working capacitor banks during the startup regime of nonlinear load were developed.

**Keywords:** power supply systems, electric power quality, reactive power, high harmonic, capacitor banks.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>6</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Аналіз існуючих методів розрахунку перетікань реактивної потужності з урахуванням якості електроенергії.....</b>	<b>14</b>
1.1. Аналіз структури систем електропостачання споживачів.....	14
1.2 Основні завдання, що потребують вирішення у системах електропостачання зі складною структурою.....	17
1.2.1 Аналіз достовірності розрахунку перетікань реактивної потужності при розбіжності номінальних напруг на межі балансової належності та місцях підімкнення приладів розрахункового обліку.....	18
1.2.2 Захист конденсаторних установок від резонансних явищ при наявності в мережі джерел вищих гармонік.....	28
1.3 Інформаційне забезпечення розрахунку перетікань реактивної потужності та режимів роботи конденсаторних установок в системах електропостачання зі складною структурою.....	33
1.3.1 Обробка даних, отриманих автоматизованими системами контролю та обліку електроенергії.....	34
1.3.2 Оперативне прогнозування, відновлення та верифікація даних автоматизованих систем обліку електроенергії.....	37
1.4 Узагальнення результатів аналізу. Обґрунтування напрямків досліджень.....	39
<b>РОЗДІЛ 2. Удосконалення методу розрахунку перетікань реактивної потужності з урахуванням якості електроенергії.....</b>	<b>41</b>
2.1 Основні положення методу розрахунку перетікань реактивної потужності при розбіжності номінальних напруг на межі балансової належності та місцях підімкнення приладів розрахункового обліку .....	41

2.2	Структура методу розрахунку перетікань реактивної потужності у випадку відсутності збігу номінальної напруги на межі балансової належності та на місцях підімкнення приладів обліку.....	54
2.3	Робота конденсаторних установок при умові наявності в мережі джерела вищих гармонік та необхідної інформації для обчислення опорів елементів її в сталому режимі роботи .....	58
2.4	Робота конденсаторних установок при умові наявності в мережі джерела вищих гармонік та відсутності необхідної інформації для обчислення опорів елементів її в сталому режимі роботи.....	75
2.5	Оптимізація перетікань реактивної потужності для різних джерел реактивної потужності та їх комбінацій.....	82
	Висновки до розділу 2.....	86
	<b>РОЗДІЛ 3. Статистичний аналіз та оперативне прогнозування електричних навантажень в системах електропостачання зі складною структурою .....</b>	<b>87</b>
3.1	Статистичний аналіз даних, зібраних автоматизованими системами контролю та обліку електроенергії.....	87
3.1.1	Розробка методики обробки даних.....	87
3.1.2	Забезпечення адекватності статистичного аналізу даних автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії.....	93
3.2	Розвиток методів верифікації даних .....	95
3.3	Вдосконалення методів оперативного прогнозування електричних навантажень за даними, зібраними автоматизованими системами контролю та обліку електроенергії .....	99
3.4	Вдосконалення методів відновлення даних, зібраних автоматизованими системами контролю та обліку електроенергії .....	108
	Висновки до розділу 3.....	116

<b>РОЗДІЛ 4. Практична реалізація розроблених методів забезпечення енергоефективності конденсаторних установок .....</b>	<b>117</b>
4.1 Алгоритм розрахунку перетікань реактивної потужності в системах електропостачання зі складною структурою.....	117
4.2 Алгоритм розрахунку імпедансу та резонансної частоти контуру, що складається з конденсаторної установки та активно-індуктивного навантаження при наявності джерел вищих гармонік .....	121
4.3 Методи запобігання резонансним явищам в короткочасних режимах у контурі з різнохарактерним навантаженням за наявності джерел вищих гармонік.....	127
4.4 Способи зменшення помилки при побудові математичних моделей, що застосовуються при проведенні оперативного прогнозування та відновлення облікових даних автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії.....	135
4.4.1 Однофакторна математична модель .....	135
4.4.2 Багатофакторна математична модель.....	141
Висновки до розділу 4.....	148
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>151</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>168</b>
Додаток А. Приклад звіту про перетікання реактивної електроенергії....	169
Додаток Б. Сертифікат відповідності програмного засобу на програмний блок розрахунку перетікань реактивної електроенергії у складі автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії.....	170
Додаток В. Практичне дослідження режиму роботи конденсаторної установки, підімкненої через одну вітку зведеного струмообмежувального реактора за наявності джерел вищих гармонік та активно-індуктивного навантаження.....	171

Додаток Г. Застосування морфологічного критерію при виборі оптимальної математичної моделі за рівноважними критеріями при умові, коли одна модель краща за адитивним критерієм, а інша – за мультиплікативним.....	188
Додаток Д. Алгоритм методу визначення імпедансу та резонансної частоти в контурі, що складається з конденсаторної установки та активно-індуктивного навантаження при наявності джерел вищих гармонік .....	195
Додаток Е. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	199
Додаток Ж. Відомості про апробацію результатів дисертації.....	203
Додаток З. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	204