

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**ЗУБКО АРЛІКІН ПЕТРОВИЧ**

**УДК 621.331:629.472.7.62-52**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ  
ЛОКОМОТИВНИХ ТА ВАГОННИХ ДЕПО**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Електротехніка та електричні машини” Української державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту і зв’язку України.

#### **Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор

**Бабасєв Михайло Михайлович,**

Українська державна академія залізничного транспорту, кафедра “Електротехніка та електричні машини”, завідувач кафедри.

#### **Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Бойнік Анатолій Борисович,**

Українська державна академія залізничного транспорту, кафедра „Автоматика та комп’ютерне телекерування рухом поїздів”, завідувач кафедри,

кандидат технічних наук, доцент

**Калмиков Віктор Ілліч,**

Харківський національний автомобільний університет, кафедра “Автомобільна електроніка”, доцент.

#### **Провідна установа**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.А.Лазаряна, кафедра автоматики, Міністерство транспорту і зв’язку України, м. Дніпропетровськ.

Захист відбудеться “20” травня 2005 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків , майдан Фейербаха 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків , майдан Фейербаха 7.

Автореферат розісланий 18 квітня 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Фалендиш А.П.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Вступ.** Залізничний транспорт є одним з найбільших споживачів енергетичних ресурсів в Україні. З усіх видів цих ресурсів найбільш широке застосування знайшла електрична енергія через відносно технічну простоту її генерації, передачі, розподілу та використання. Якість і ефективність технологічних процесів, конкурентоспроможність готової продукції або послуг підприємства в значній мірі визначається їхньою енергетичною ефективністю, досягнення якої можливе тільки за умови виключення нераціональної витрати і ненормативних втрат енергії. Виходячи з цього виникає необхідність впровадження на транспорті нових енергозберігаючих технологій, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації транспортних засобів та знизити їх енерговитрати.

**Актуальність теми.** Обмеженість запасів традиційних паливно-енергетичних ресурсів змусила звернутися до енергозбереження як одного з основних елементів сучасної концепції розвитку світової енергетики. Глобальні енергетичні проблеми вимагають, з однієї сторони, пошуку та розроблення нових ефективних та екологічно чистих джерел енергії, з другої – організації оптимального керування розвитком та експлуатацією існуючих енерговиробних, енергоперетворюючих та енергоспоживаючих систем.

Одними з енергоємних підрозділів залізничного транспорту є компресорні станції локомотивних та вагонних депо, на які припадає до 80% усієї спожитої ними електроенергії. Тому в роботі проведений пошук ефективних шляхів зниження енерговитрат компресорних станцій без збитку для технологічного процесу, пропонуються науково обґрунтовані технічні рішення з їх реалізації. Це дозволяє кваліфікувати тему дисертації як актуальну.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електротехніки та електричних машин Української державної академії залізничного транспорту відповідно до планів науково-дослідних робіт академії, що проводяться в рамках галузевих програм у наукових напрямках Міністерства транспорту та зв'язку України за замовленням Державної адміністрації залізничного транспорту України за темою “Дослідження та розробка адаптивної системи контролю та обліку споживання електроенергії компресорною станцією

депо ” (ДР № 0103U002529).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо шляхом оптимізації режимів їх роботи. Для досягнення заданої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- виконати аналіз факторів, що впливають на нераціональні витрати спожитої електроенергії на залізничному транспорті, та шляхів її зниження на компресорних станціях без збитку для їх технологічного процесу;

- науково обґрунтувати основні принципи побудови методів регулювання синхронних приводів компресорів та засобів оптимізації режимів їх роботи;

- розробити математичні моделі регульованих синхронних приводів;

- реалізувати запропоновану методологію у вигляді регуляторів процесу збудження двигунів;

- розробити методи оцінювання похибки реалізації та збіжності алгоритмів регулювання запропонованих регуляторів;

- провести дослідження динаміки процесу регулювання коефіцієнта потужності синхронних двигунів та характеру поведінки процедури регулювання;

- провести синтез алгоритмів роботи регулятора у термінах вхідних впливів на нього і вихідних реакцій;

- обґрунтувати доцільність використання отриманих результатів.

**Об'єктом досліджень** є автоматизовані процеси керування режимами роботи синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо.

**Предмет досліджень** - регульовані приводи компресорів.

**Методи дослідження** - обґрунтування основних принципів побудови методів керування регульованими приводами компресорів базується на теорії електричних машин, електротехніки, електричних кіл та статистичної радіотехніки; синтез пристроїв автоматичного регулювання синхронних двигунів - на теорії автоматичного регулювання та моделювання складних систем; методи оцінювання похибки реалізації та збіжності ітеративних алгоритмів регулювання запропонованих засобів керування - на теорії цифрових фільтрів, методах оптимізації.

**Наукова новизна одержаних результатів** роботи полягає в подальшому підвищенні ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо шляхом оптимізації режимів їх роботи, а саме:

- подальший розвиток теоретичних основ дослідження процесів керування регульованими приводами компресорів дозволив розрахувати

точність відпрацьовування різниці фаз напруги і струму фази синхронних двигунів при використанні в якості вхідних даних вимірювань активної і реактивної потужностей;

- вперше розроблені математичні моделі характеристик регулювання синхронних двигунів компресорів дозволили визначити числові похибки регулювання кута  $\varphi$  і коефіцієнта потужності  $\lambda$ , що виникають при реалізації законів регулювання;

- удосконалена математична модель роботи регульованого привода компресора, що зв'язує вхідні впливи на нього з його поточними характеристиками, дозволила провести синтез алгоритмів роботи регулятора у термінах вхідних впливів і вихідних реакцій;

- удосконалені методи оцінювання похибки реалізації та збіжності ітеративних алгоритмів регулювання дозволили оцінити динаміку процесу на комп'ютерній моделі та підтвердили стійкість і високу швидкість збіжності регулятора, навіть при значних перепадах регульованого параметра  $\varphi$ ;

- вперше теоретично обґрунтоване асимптотичне поведіння ітеративної процедури регулювання приводом компресора дозволило розрахувати нову величину керуючого впливу на підставі його попередньої величини і результатів вимірювань на поточному етапі регулювання.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропонований в дисертаційній роботі комплекс технічних засобів підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів приводів компресорів локомотивних та вагонних депо дозволяє за рахунок оптимізації режимів їх роботи знизити енерговитрати компресорних станцій без збитку для технологічного процесу на (8-12) %. Розрахунковий економічний ефект, очікуваний при впровадженні запропонованих методів підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів у вагонному депо ст. Основа Південної залізниці в період з 2004 по 2009 рр., складає 668,7 тис. грн у цінах 2004р. Практичне впровадження основних результатів роботи підтверджується документами, що наведені в відповідних додатках до роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать:

- аналіз існуючих систем енергопостачання та існуючих об'єктів споживання електроенергії на залізничному транспорті [1]; особливості залізничних споживачів як електричних навантажень з погляду теорії електричних кіл [2]; пропонуються основні принципи побудови адаптивної системи контролю й обліку споживаної енергії [3]; на основі теорії цифрових фільтрів та прикладного нелінійного програмування проведені дослідження збіжності ітеративних алгоритмів регулювання коефіцієнта потужності

синхронних двигунів [4]; розробка структурної схеми системи обліку кількості і вартості споживання електричної енергії залізницями [7].

**Апробація результатів дисертації.** Основні матеріали і результати дисертаційної роботи доповідалися й отримали схвалення:

- на 15 – 17-й міжнародних школах-семінарах “Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті” (м. Алушта, 2002-2004 рр.);
- на щорічних науково-технічних конференціях Української державної академії залізничного транспорту з міжнародною участю фахівців залізничного транспорту (м. Харків, 2002 - 2004 рр.).

Повністю дисертаційна робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри електротехніки та електричних машин Української державної академії залізничного транспорту з участю членів спеціалізованої вченої ради (2004 р.)

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано шість статей у фахових наукових виданнях, у тому числі дві – без співавторів і два патента України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 151 сторінок, із яких 136 сторінок основного тексту, 32 рисунка (із них 2 рисунка на 2 сторінках), список літератури з 104 найменувань використаних джерел на 11 сторінках і 1 додатку на 2 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, формулюється мета, задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Відображені основні наукові положення і результати досліджень, що виносяться на захист. Наведена інформація про структуру дисертації, публікації та апробацію робіт.

**У першому розділі** подано аналіз сучасного стану і перспектив розвитку існуючих засобів збереження енергоресурсів на залізничному транспорті, нових енергозберігаючих технологій та систем контролю і управління, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації синхронних двигунів приводів компресорів та знизити їх енерговитрати.

У розвиток теорії та практики впровадження сучасних методів автоматизованого контролю та обліку споживаної електроенергії на транспорті зробили великий внесок такі вчені: В.Т. Доманський, М.Д. Дубовий, В.В. Корнієнко, Є.М. Портнов, О.І. Стасюк, Б.С. Стогній та ін. Вагомий внесок у вирішення фундаментальних проблем розроблення систем

автоматизованого управління та контролю складними технологічними процесами зробили А. Б. Бойнік, В.І. Гаврилюк, Ю.І. Гусевський, Г.І. Загарій, В.І. Калмиков, В.М. Кунцевич, Ю.В. Соболев, А.А. Тунік, Я.З. Ципкін та ін. Проте в даний час задача вдосконалення засобів керування процесом енергоспоживання на компресорних станціях локомотивних та вагонних депо залізничного транспорту вирішується недостатньо. Проблема ускладнюється ще й тим, що основні залізничні споживачі електроенергії можуть бути охарактеризовані як істотно нелінійні комплексні опори, що обумовлюють полігармонічні спектри напруг і струмів живильних кіл, тобто періодичний несинусоїдальний вид зазначених напруг і струмів. У багатьох випадках структура навантажень і електричних процесів у них носить імовірнісний характер. Значна економія електроенергії досягається зменшенням її втрат у живильній мережі. Ці втрати викликані перш за все наявністю реактивної складової комплексного опору навантажень. Тому з точки зору збереження електроенергії надзвичайно важливими є пристрої, які забезпечують компенсацію реактивної потужності.

З урахуванням вимог до якості функціонування будь-якої системи автоматичного управління система керування ефективним використанням синхронних двигунів на компресорній станції повинна являти собою комплекс апаратних і програмних засобів для забезпечення можливості реалізації таких функцій:

- вимірювання активної, реактивної та повної енергії;
- дистанційного зчитування кількості активної, реактивної та повної енергії;
- організації роботи в умовах застосування диференційованих у часі тарифів на електричну енергію;
- обробки й аналізу даних про рівні споживаних активної, реактивної, повної потужностей;
- регулювання співвідношення споживаних від мережі активної і реактивної потужностей з метою підтримки коефіцієнта потужності в живильній мережі від працюючого навантаження близьким до 1 ( $\cos \varphi \rightarrow 1$ ).

Таким чином, система керування ефективністю використання синхронних приводів компресорів повинна відноситися до класу систем управління по замкнутому контуру з дискретними алгоритмами оптимального управління та пошуку екстремуму показника якості.

**У другому розділі** розглядаються теоретичні основи побудови методів керування процесом збудження синхронних двигунів приводів компресорів.

Безпосередньо регульованим параметром двигуна є струм збудження індуктора  $i_f$ . Створений ним магнітний потік індукує в обмотці якоря електрорушійну силу (ЕРС)  $E_f$ . Зв'язок між  $E_f$  і  $i_f$  являє собою

характеристику холостого ходу розглянутої синхронної машини. Функція  $E_f(i_f)$  передбачається точно відомою. Електрорушійна сила  $E_f$  та активна потужність  $P$ , споживана синхронним двигуном неявнополюсної конструкції, визначаються відомими виразами

$$E_f = U \cdot [\cos \Theta + \operatorname{tg}(\Theta + \varphi) \cdot \sin \Theta], \quad (1)$$

$$P = \frac{3E_f \cdot U}{X} \cdot \sin \Theta, \quad (2)$$

де  $U$  - напруга живильної мережі;

$X$  - реактивний опір обмотки фази;

$\varphi$  - кут між ЕРС збудження  $E_f$  та споживаним струмом  $I$ ;

$\Theta$  - кут між напругою  $U$  і ЕРС  $E_f$ .

Процедура регулювання двигуна для установлення заданого значення величини  $\varphi$ , що визначає коефіцієнт потужності  $\lambda = \cos \varphi$ , така: заміряється  $P$  і  $i_f$ ; обчислюється  $E_f(i_f)$ ; обчислюється величина  $\Theta$ ; підстановкою обчисленого  $\Theta$  і заданого  $\varphi$  в (1) знаходимо необхідне (нове) значення  $E_f$ ; за відомою характеристикою холостого ходу знаходимо нове значення  $i_f$  і встановлюємо цей струм в індукторі. Потенційними джерелами неточності такого регулювання є неточно відомі величини  $P, U, X$ , що входять у вираз (2), а також неточна відповідність аналітичної залежності  $E_f(i_f)$  реальній залежності між струмом і ЕРС збудження. Розглянемо вплив на величину  $\varphi$  неточності вимірювання активної потужності, споживаної двигуном. Нехай величина  $P$  вимірювана з деякою похибкою  $\Delta P$ , тобто

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (3)$$

де  $P_0$  - дійсна величина активної потужності.

Підстановка  $P$  у вираз (2) приведе до похибки  $\Delta \Theta$  розрахунку величини  $\Theta$ :

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta \Theta, \quad (4)$$

де  $\Theta_0$  - дійсна величина кута  $\Theta$ .

Відповідно до (1) нове значення  $E_f$ , що забезпечує заданий кут  $\varphi$  при розрахованому куті  $\Theta$ , буде мати похибку  $\Delta E_f$ :

$$\Delta E_f = \frac{\Delta P \cdot X}{3E_{f\text{ном}}} \cdot \operatorname{tg}(\Theta_0 + \varphi) \cdot [1 + \operatorname{tg}(\Theta_0 + \varphi) \cdot \operatorname{tg} \Theta_0], \quad (5)$$



$$\Delta\varphi = \frac{\Delta P \cdot X}{6UE_{f_{\text{вум}}}} \cdot \frac{1}{\sin \Theta_0} \cdot \sin[2(\Theta_0 + \varphi_0)] \cdot [1 + \operatorname{tg}(\Theta_0 + \varphi_0) \cdot \operatorname{tg} \Theta_0]. \quad (6)$$

де  $\Delta P$  - похибка вимірювання активної потужності.

Знайдемо похибку  $\Delta\varphi$  устанавлення кута  $\varphi$ .

Відповідні графіки для величини  $\Delta\varphi$ , вираженої в радіанах і нормованої до множника  $\frac{\Delta P \cdot X}{(6UE_{f_{\text{вум}}})}$ , наведені на рис. 1.

Рис. 1. Графіки залежності похибки  $\Delta\varphi$  устанавлення кута  $\Theta$

На рис.2 наведені графіки  $p_\varphi(\varphi)$ , розраховані для таких параметрів розподілу:  $P_0 = 10$  кВт,  $P_1 = 5$  кВт,  $P_2 = 15$  кВт,  $Q_0 = -2$  кВАр,  $Q_1 = -7$  кВАр,  $Q_2 = 3$  кВАр. Середньоквадратичні відхилення вимірювань потужностей покладалися рівними один одному і набували значень 1,2 і 3 В·А. Величина  $\varphi_0 = \arctg(Q_0/P_0) = -0,197$  радіан. Це дозволило визначити числові характеристики похибки регулювання кута  $\varphi$ , а з ним – і коефіцієнта потужності  $\lambda = \cos\varphi$ .

Рис. 2. Числові характеристики похибки регулювання кута  $\varphi$

Проаналізуємо можливість регулювання синхронних двигунів за вимірами повного струму статора і порівняємо їх з аналогічними показниками раніше розглянутого способу. Нехай величина  $I$  повного струму вимірюється з похибкою  $\Delta I$ . Тоді величина  $E_f$  буде обчислена з похибкою  $\Delta E_f$ . Знайдемо величину похибки  $\Delta\varphi$ , що виникла через неточне встановлення величини  $E_f$ .

$$\Delta\varphi = \frac{I_0 + I_\delta \sin \varphi_0}{I_0 I_\delta \cos \varphi_0} \cdot \Delta I = \frac{1}{I_\delta} \cdot \frac{w_0 + \sin \varphi_0}{w_0 \cos \varphi_0}, \quad (7)$$

де  $I_\delta$  - струм статора;

$w_0$  - нормований струм статора,  $w_0 = I_0 / I_\delta$  ;

$I_0$  - точне значення струму статора.

$$r_{\varphi P I} = \frac{\Delta\varphi_P}{\Delta\varphi_I} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\cos^2 \varphi_0}{(w_0 + \sin \varphi_0) \cdot \sin \left[ \Theta_0 + \arcsin \left( \frac{1}{w_0} \sin \Theta_0 \right) \right]} \times$$

$$\times \sin[2(\Theta_0 + \varphi_0)] \cdot [1 + \operatorname{tg}(\Theta_0 + \varphi_0)\operatorname{tg}\Theta_0]. \quad (8)$$

Діаграми залежності  $r_{\varphi_{PI}}(\varphi_0, \Theta_0)$  від параметра  $w_0$  наведені на рис. 3.

Рис. 3. Діаграми залежності  $r_{\varphi_{PI}}(\varphi_0, \Theta_0)$  від параметра  $w_0$

З цих діаграм випливає, що, по-перше, у широкому діапазоні величин кутів  $\varphi_0$  і  $\Theta_0$  похибка  $\Delta\varphi_P$  регулювання по вимірюваннях потужності менша, ніж похибка  $\Delta\varphi_I$  регулювання по вимірюваннях струму (фактично цей діапазон починається з  $\Theta_0 \approx 5^\circ$  і має місце при всіх припустимих значеннях  $\varphi_0$ ). По-друге, зі зростанням параметра  $w_0$  ширина цього діапазону зростає за кутом  $\Theta_0$ ; лише при  $w_0 = 0,9$  і при  $\Theta_0 \geq 50^\circ$  величина  $\Delta\varphi_P$  знову наближається до величини  $\Delta\varphi_I$ .

**У третьому розділі** розглядаються методи моделювання і реалізації пристроїв автоматичного регулювання синхронних двигунів.

Для проведення цифрового моделювання процесу регулювання синхронного двигуна з автоматично регульованим коефіцієнтом потужності був обраний двигун МС321 з такими характеристиками:  $P = 640\text{кВт}$ ,  $U = 3000\text{В}$ , номінальне значення  $\cos\varphi = 0,8$ . Виходячи з цих даних були отримані: активна електрична потужність на одну фазу  $P_{\text{факт}} = 210\text{кВт}$ ; реактивний опір однієї фази обмотки  $X_{\text{факт}} = 100\text{Ом}$ . На рис. 4 наведені результати моделювання з початкового значення  $\varphi_{\text{факт}(1)} = 38,7^\circ$  (що відповідає номінальному  $\cos\varphi = 0,8$ ) до значень  $\varphi_{\text{зад}} = 30^\circ, 20^\circ$  і  $10^\circ$ .

Рис. 4. Графіки процесу встановлення заданого кута  $\varphi$

На рис. 4 N - номер кроку регулювання. Точки графіків для більшої наочності з'єднані суцільними лініями, хоча процес регулювання, звичайно, дискретний. Як показали розрахунки, похибка регулювання зменшується до одного відсотка від заданої величини ( $\varepsilon = 0,01$ ) при  $\varphi_{\text{зад}} = 30^\circ$  – на 22-му кроці, при  $\varphi_{\text{зад}} = 20^\circ$  – на 15-му кроці і при  $\varphi_{\text{зад}} = 10^\circ$  – на 10-му кроці. Графіки, що ілюструють процеси встановлення ЕРС збудження  $E_f$  в ході регулювання кута  $\varphi$ , наведені на рис. 5.

Рис. 5. Графіки процесів встановлення ЕРС збудження  $E_f$ 

Можна констатувати коливальний характер устанавлення  $E_f$ . Це через однозначний зв'язок  $E_f$  зі струмом збудження  $i_f$  говорить, що в розглянутій системі автоматичного регулювання збудження такий же характер буде мати і струм збуджувача. На рис.6 наведені результати моделювання процесу регулювання з початкових значень  $\varphi_{\text{факт}(1)} = 20^\circ$  і  $\theta_{\text{факт}(1)} = 30^\circ$  до заданого значення  $\varphi_{\text{зад}} = 38,7^\circ$  (що відповідає номінальному  $\cos\varphi = 0,8$ ).

Існує набагато триваліше встановлення заданої величини, ніж те, що спостерігається в ситуації, що відповідає даному процесу регулювання. У зв'язку з цим доцільним є використання більш точного розрахунку величини  $E_f$ .

Рис.6. Результати моделювання процесу регулювання з початкових

значень  $\varphi_{\text{факт}(1)} = 20^\circ$  і  $\theta_{\text{факт}(1)} = 30^\circ$

Однак при заданих  $P = \text{const}$  і  $\varphi = \varphi_{\text{зад}}$  величина  $\theta$  - теж задана, у силу чого доцільно включити в закон регулювання і відхилення фактичної величини  $\theta$  від її заданого значення  $\theta_{\text{зад}}$ . При цьому варто очікувати, що обчислене виправлення до поточної величини  $E_f$  буде більш точним на кожному кроці розрахунку, а отже – що збіжність процесу регулювання істотно покращиться.

**У четвертому розділі** досліджується динаміка процесу регулювання коефіцієнта потужності синхронних двигунів.

Розкладемо (1) в ряд Тейлора по двох змінних в межах заданої точки  $(\varphi_{\text{зад}}, \theta_{\text{зад}})$  й віднімемо тільки доданки з похідними першого порядку:

$$E_f(\varphi, \theta) \approx E_f(\varphi_{\text{зад}}, \theta_{\text{зад}}) + \frac{\partial E_f}{\partial \varphi} \bigg|_{\substack{\varphi=\varphi_{\text{зад}} \\ \theta=\theta_{\text{зад}}}} \cdot (\varphi - \varphi_{\text{зад}}) + \frac{\partial E_f}{\partial \theta} \bigg|_{\substack{\varphi=\varphi_{\text{зад}} \\ \theta=\theta_{\text{зад}}}} \cdot (\theta - \theta_{\text{зад}}). \quad (9)$$

Введемо позначення:

$$E'_{f\varphi}(\varphi_{\text{зад}}, \theta_{\text{зад}}) = \frac{\partial E_f}{\partial \varphi} \bigg|_{\substack{\varphi=\varphi_{\text{зад}} \\ \theta=\theta_{\text{зад}}}},$$

$$E'_{f\theta}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) = \left. \frac{\partial E_f}{\partial \theta} \right|_{\substack{\varphi=\varphi_{зад} \\ \theta=\theta_{зад}}},$$

тоді

$$\begin{aligned} E_f(\varphi, \theta) \approx E_f(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) + E'_{f\varphi}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) \cdot (\varphi - \varphi_{зад}) + \\ + E'_{f\theta}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) \cdot (\theta - \theta_{зад}). \end{aligned} \quad (10)$$

Якщо інтерпретувати величини  $\varphi$  і  $\theta$  як вимірювані  $\varphi_{вим}$  і  $\theta_{вим}$ , то величину ЕРС збудження, необхідну для установлення у двигуні заданих значень цих величин, можна одержати з виразу як

$$\begin{aligned} E_f(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) \approx E_f(\varphi_{вим}, \theta_{вим}) - E'_{f\varphi}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) \cdot (\varphi_{вим} - \varphi_{зад}) - \\ - E'_{f\theta}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) \cdot (\theta_{вим} - \theta_{зад}). \end{aligned} \quad (11)$$

Таким чином, необхідне значення  $E_f$  обчислюється шляхом внесення у вимірюване значення виправлень, отриманих шляхом порівняння параметрів  $\varphi$  і  $\theta$  з їх опорними (заданими) значеннями  $\varphi_{зад}$  і  $\theta_{зад}$ . Вирази для похідних, що входять у співвідношення (11), одержуємо шляхом диференціювання виразу (1) по  $\varphi$  і по  $\theta$  з підстановкою  $\varphi = \varphi_{зад}$  і  $\theta = \theta_{зад}$ :

$$E'_{f\varphi}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) = E'_{f\varphi} = \frac{U \cdot \sin \theta_{зад}}{\cos^2(\theta_{зад} + \varphi_{зад})}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E'_{f\theta}(\varphi_{зад}, \theta_{зад}) = E'_{f\theta} = U \cdot \left[ -\sin \theta_{зад} + \frac{\sin \theta_{зад}}{\cos^2(\theta_{зад} + \varphi_{зад})} + \operatorname{tg}(\theta_{зад} + \varphi_{зад}) \cdot \cos \theta_{зад} \right] = \\ = U \cdot \operatorname{tg}(\theta_{зад} + \varphi_{зад}) \cdot [\sin \theta_{зад} \cdot \operatorname{tg}(\theta_{зад} + \varphi_{зад}) + \cos \theta_{зад}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Регулювання на задані величини  $\varphi_{зад}$  і  $\theta_{зад}$  при  $P = \text{const}$  виконується в такий спосіб:

- задається  $\varphi_{зад}$ ;
- обчислюється  $Q_{зад} = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_{зад}$ ;

- обчислюється  $\theta_{зад} = \arctg \frac{P}{Q_{зад} + \frac{3U^2}{X}}$ ;
- обчислюються похідні відповідно до виразів (10) і (11);
- вимірюються  $P_{вим}$  і  $Q_{вим}$ ;
- обчислюються  $\varphi_{вим} = \arctg(Q_{вим} / P_{вим})$ ;
- обчислюється  $\theta_{вим} = \arctg \frac{P}{Q_{вим} + \frac{3U^2}{X}}$ ;
- за формулою (11) обчислюється нова величина  $E_f$ ;
- ця величина  $E_f$  перераховується в струм збудження  $i_L$ ;
- цей струм устанавлюється в ланцюзі збудження.

Структурна схема регулятора коефіцієнта потужності при заданих величинах  $\varphi_{зад}$ ,  $\theta_{зад}$  і  $P = const$  наведена на рис. 7.

Рис. 7. Структурна схема регулятора коефіцієнта потужності при заданих величинах  $\varphi_{зад}$ ,  $\theta_{зад}$  і  $P = const$

Як і для регулятора, розглянутого в розділі 3, моделювався синхронний двигун МС321 з тими ж значеннями параметрів. Регулювання починалося з  $\varphi_{факт(1)} = 38,7^\circ$  (що відповідало номінальному  $\cos = 0,8$ ) і виконувалося до значень  $\varphi_{зад} = 30^\circ, 20^\circ$  і  $10^\circ$ . На рис.8 наведені результати моделювання процесу регулювання з початкових значень  $\varphi_{факт(1)} = 20^\circ$  і  $30^\circ$  до заданого значення  $\varphi_{зад} = 38,7^\circ$ , що відповідає номінальному  $\cos\varphi = 0,8$ .

Аналіз результатів моделювання ілюструє істотну перевагу регулятора на задані величини  $\varphi_{зад}$  і  $\theta_{зад}$  при  $P = const$  в порівнянні з тим, що розглянутий у розділі 3. Починаючи з четвертого кроку регулювання відносна похибка устанавлення величин  $\varphi$  і  $E_f$  складає менш 0,1%, при цьому процес устанавлення не коливальний, як у попередньому регуляторі, а аперіодичний. На рис. 8 показано, що величина  $\theta$  встанавлюється настільки ж швидко й аперіодично.

Результати моделювання підтвердили стійкість і високу швидкість збіжності регулятора навіть при великих перепадах регульованого параметра  $\varphi$ . Практично сталі значення досягається на третьому-четвертому кроці регулювання, тобто через два-три інтервали регулювання.

Рис.8. Результати моделювання процесу регулювання на задані величини  $\varphi_{зад}$  і  $\theta_{зад}$ :

- а - графік зміни величини кута  $\varphi$  впродовж процесу регулювання;
- б - графік зміни величини кута  $\theta$  впродовж процесу регулювання;
- в - графік зміни величини кута  $E_f$  впродовж процесу регулювання

Оскільки моделювання проводилося за умови  $P = const$ , то можна зробити висновок про те, що регулятор здатний утримувати задане значення кута  $\varphi$  і при активній потужності, величина якої змінюється в часі, за умови, що тривалість характерного інтервалу часу, протягом якого  $P$  змінюється істотно, складає не менш потроєної тривалості інтервалу регулювання.

В заключній частині розділу приведено, що впровадження технічних засобів керування процесом енергоспоживання дозволяє підвищити ефективність експлуатації синхронних двигунів приводів компресорів локомотивних та вагонних депо за рахунок оптимізації режимів їх роботи і знизити енерговитрати компресорних станцій на (8-12) %. Розрахунковий економічний ефект, очікуваний при впровадженні запропонованих методів підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів у вагонному депо ст. Основа Південної залізниці в період з 2004 по 2009 рр., складає 668,7 тис. грн у цінах 2004р.

Практичне впровадження основних результатів роботи підтверджується документами, що наведені в відповідних додатках до роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова задача підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо шляхом оптимізації режимів їх роботи. При цьому отримані такі результати:

1. Виконаний аналіз шляхів енергозбереження на залізничному транспорті, що показав високу динаміку об'єктів енергоспоживання і різноманітність вимог до них по кількості та якості споживної електроенергії, дозволив встановити необхідність вирішення задачі керування процесом енергоспоживання та створення і впровадження автоматизованих або повністю автоматичних пристроїв керування енергоспоживаючими об'єктами. Це дало можливість визначити практичні шляхи підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій

локомотивних та вагонних депо, що здатні в реальному масштабі часу адаптуватися до змін у їх навантаженні, а також до поточної ситуації в живильній електромережі.

2. Виходячи з аналізу прикладних проблем енергоефективності, якісних характеристик структури та алгоритмів її функціонування, встановлено, що система ефективного використання синхронних двигунів компресорної станції повинна відноситися до класу систем управління по замкнутому контуру з виміром значення керованої величини і дискретними алгоритмами оптимального управління та пошуку екстремуму показника якості.

3. На підставі подальшого розвитку теоретичних основ дослідження процесів керування приводами компресорів науково обґрунтовані основні принципи побудови методів їх регулювання та розрахована точність відпрацьовування різниці фаз напруги і струму синхронних двигунів при використанні в якості вхідних даних вимірювань активної і реактивної потужностей.

4. На підставі розробленої математичної моделі регульованого привода компресора визначені числові характеристики похибки регулювання кута  $\varphi$  і коефіцієнта потужності  $\lambda$  та встановлено, що у широкому діапазоні величин кутів  $\varphi_0$  і  $\Theta_0$  похибка  $\Delta\varphi_p$  регулювання по вимірюваннях потужності двигунів менша, ніж похибка  $\Delta\varphi_l$  регулювання по вимірюваннях струму.

5. Запропоновані методи оцінювання похибки реалізації та збіжності ітеративних алгоритмів регулювання дозволили встановити, що при регулюванні синхронного двигуна на установлення заданої величини кута  $\varphi$  по вимірюваннях споживаного струму статора процес регулювання носить коливальний характер, а похибка регулювання зменшується до одного відсотка від заданої величини ( $\varepsilon = 0,01$ ) при  $\varphi_{зад} = 30^\circ$  – на 22-му кроці, при  $\varphi_{зад} = 20^\circ$  – на 15-му кроці і при  $\varphi_{зад} = 10^\circ$  – на 10-му кроці. В той же час у регуляторі на задані величини  $\varphi_{зад}$  і  $\theta_{зад}$  при  $P = const$ , вже починаючи з четвертого кроку регулювання, відносна похибка установлення величин  $\varphi$  і  $E_f$  складає менш 0,1%. При цьому процес установлення не коливальний, а аперіодичний.

6. Шляхом теоретичного обґрунтування встановлено асимптотичне поведіння ітеративної процедури регулювання приводом компресора, що дозволило підтвердити стійкість і високу швидкість збіжності синтезованого регулятора навіть при великих перепадах регульованого параметра  $\varphi$ .

7. Удосконалена математична модель роботи регульованого привода компресора дозволила провести синтез алгоритмів роботи та реалізацію автоматичного регулятора у термінах вхідних впливів і вихідних реакцій, що

дало змогу підвищити ефективність експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій шляхом оптимізації режимів їх роботи на (8-12) %. Розрахунковий економічний ефект, очікуваний при впровадженні запропонованих методів підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів у вагонному депо ст. Основа Південної залізниці в період з 2004 по 2009 рр., складає 668,7 тис. грн у цінах 2004р.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бабаєв М.М., Давиденко М.Г., Зубко А.П. Залізничний транспорт як об'єкт електропостачання// Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2002. – Вип. 49. – С. 5-12.

2. Бабаєв М.М., Соболев Ю.В., Зубко А.П. Особенности потребления электрической энергии на железнодорожном транспорте// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. - № 4,5. – С. 114-116.

3. Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Кошевий С.В., Зубко А.П. Система енергозбереження споживаної електроенергії // Залізничний транспорт України. – 2004. - № 3. – С. 20-21.

4. Бабаєв М.М., Зубко А.П. Исследование алгоритмов регулирования коэффициента мощности синхронных двигателей // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. - № 4,5. – С. 123-126.

5. Зубко А.П. Агрегативная модель регулируемого синхронного двигателя // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 58. – С. 125-130.

6. Зубко А.П. Алгоритм цифрового моделирования синхронного электродвигателя с автоматически регулируемым коэффициентом мощности // Залізничний транспорт України. – 2004. - № 5. – С. 24-26.

7. Декл. пат. 37884 А Україна, МПК G 01D 4/00, G 01R 11/56. Комп'ютерна система обліку кількості і вартості споживання електричної енергії залізницями: Пат. 37884 А Україна, МПК G 01D 4/00, G 01R 11/56/ І.В. Анохов, А.П. Зубко, В.Г. Мішечкін, І.В. Малишко, Б.М. Березовський, В.Г. Домбровська, О.І. Стасюк (Україна). - №2000042435; Заявл.27.04.2000; Опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4. – 8 с.; іл. 1.

8. Декл. пат. 32395 А Україна, МПК G 06F 17/60. Комп'ютерна система реєстрації аварійних режимів на тягових електричних підстанціях залізниць: Пат. 32395 А Україна, МПК G 06F 17/60/ І.В. Анохов, В.Г. Мішечкін, А.П. Зубко, Б.С. Стогній, М.Ф. Сопель, О.І. Стасюк (Україна). - № 99126716; Заявл. 10.12.1999; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7-II. – 10 с.; іл. 8.

## АНОТАЦІЯ



Зубко А.П. Підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. - Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2005.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності експлуатації синхронних двигунів компресорних станцій локомотивних та вагонних депо залізничного транспорту. У роботі проведено теоретичне обґрунтування основних принципів побудови методів регулювання синхронних приводів компресорів та засобів оптимізації режимів їх роботи, що здатні у реальному масштабі часу адаптуватися до змін у навантаженні, а також до поточної ситуації в живильній електромережі. Удосконалені методи оцінювання похибки реалізації та збіжності ітеративних алгоритмів регулювання. Проведено оцінювання динаміки процесу регулювання на комп'ютерній моделі, що підтвердило стійкість і високу швидкість збіжності регулятора. Розроблені математичні моделі регульованих синхронних приводів реалізовані у вигляді регуляторів процесу збудження двигунів. Це дозволило підвищити ефективність їх експлуатації на (8-12) %.

Ключові слова: синхронний двигун, процес регулювання, струм збудження, коефіцієнт потужності, регулятор, алгоритм, синтез, похибка, математична модель.

## **АННОТАЦИЯ**

Зубко А.П. Повышение эффективности эксплуатации синхронных двигателей компрессорных станций локомотивных и вагонных депо. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – “Эксплуатация и ремонт средств транспорта”. - Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2005.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности эксплуатации синхронных двигателей компрессорных станций локомотивных и вагонных депо железнодорожного транспорта.

Выполненный в работе анализ режимов и условий эксплуатации объектов энергопотребления на транспорте показал высокую динамику и разнообразие предъявляемых к ним требований по количеству и качеству потребляемой электроэнергии. Из этого вытекает необходимость решения задачи управления процессом энергопотребления, а также создания и внедрения автоматизированных или полностью автоматических устройств

управления энергопотребляющими объектами.

Исходя из анализа прикладных проблем энергоэффективности, качественных характеристик структуры и алгоритмов ее функционирования, установлено, что устройства управления процессом энергопотребления должны относиться к классу управляющих систем по замкнутому контуру с измерением значения управляемой величины, дискретными алгоритмами оптимального управления и поиска экстремума показателя качества.

В работе определены практические пути повышения эффективности эксплуатации синхронных двигателей компрессорных станций локомотивных и вагонных депо, проведено теоретическое обоснование основных принципов построения методов регулирования синхронных приводов компрессоров и средств оптимизации режимов их работы, которые способны в реальном масштабе времени адаптироваться к изменениям в нагрузке, а также к текущей ситуации в питательной электросети.

Дальнейшее развитие теоретических основ исследования процессов управления синхронными приводами компрессоров позволило научно обосновать основные принципы построения методов и средств их регулирования, что дало возможность рассчитать точность отработки различия фаз напряжения и тока синхронных двигателей в процессе их регулирования при использовании в качестве входных данных измерений активной и реактивной мощностей.

Разработаны математические модели регулируемых синхронных приводов, которые реализованы в виде регуляторов процесса возбуждения двигателя. Усовершенствованы методы оценки погрешности реализации и сходимости итеративных алгоритмов регулирования. Проведена оценка динамики процесса регулирования на компьютерной модели, что подтвердило стойкость и высокую скорость сходимости регулятора.

На основании разработанной математической модели регулируемого привода компрессора определены числовые характеристики погрешности регулирования угла  $\varphi$  и коэффициента мощности  $\lambda$  и установлено, что в широком диапазоне величин углов  $\varphi_0$  и  $\Theta_0$  погрешность  $\Delta\varphi_p$  регулирования по измерениям мощности двигателей меньшая, чем погрешность  $\Delta\varphi_t$  регулирования по измерениям тока.

Предложены методы оценки погрешности реализации и сходимости итеративных алгоритмов регулирования, позволившие установить, что при регулировании синхронного двигателя на установление заданной величины угла  $\varphi$  по измерениям потребляемого тока статора процесс регулирования носит колебательный характер, а погрешность регулирования уменьшается до одного процента от заданной величины ( $\varepsilon = 0,01$ ) при  $\varphi_{зад} = 30^\circ$  – на 22-ом

шаге, при  $\varphi_{зад} = 20^\circ$  – на 15-ом шаге и при  $\varphi_{зад} = 10^\circ$  – на 10-ом шаге. В то же время в регуляторе на заданные величины  $\varphi_{зад}$  и  $\theta_{зад}$  при  $P = const$ , уже начиная с четвертого шага регулирования, относительная погрешность установления величин  $\varphi$  и  $E_f$  составляет менее 0,1%. При этом процесс установления не колебательный, а апериодический.

Путем теоретического обоснования установлено асимптотическое поведение итеративной процедуры регулирования синхронным приводом компрессора, что разрешило подтвердить стойкость и высокую скорость сходимости синтезированного регулятора даже при больших перепадах регулируемого параметра  $\varphi$ . Усовершенствованная математическая модель работы регулируемого привода компрессора позволила провести синтез алгоритмов работы и реализацию автоматического регулятора в сроках входных влияний и исходных реакций, что дало возможность повысить эффективность эксплуатации синхронных двигателей компрессорных станций путем оптимизации режимов их работы на 8-12%. Расчетный экономический эффект, ожидаемый при внедрении предложенных методов повышения эффективности эксплуатации синхронных двигателей в вагонном депо ст. Основа Южной железной дороги в период с 2004 по 2009 гг. составляет 668,7 тыс. грн в ценах 2004г.

Ключевые слова: синхронный двигатель, процесс регулирования, ток возбуждения, коэффициент мощности, регулятор, алгоритм, синтез, погрешность, математическая модель.

### THE SUMMARY

Zubko A.P. Efficiency operation increase of synchronous engines of locomotive and wagon depots compressor stations. - the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.22.20 - "Operation, maintenance, repair of transportation means". - the Ukrainian state academy of railway transport, Kharkov, 2005.

The dissertation is devoted to the questions of efficiency operation increase of synchronous engines of locomotive and wagon depots compressor stations for railway. In the research the theoretical substantiation of the main principles relating to the construction of regulation methods of synchronous compressor drives and the means of optimization concerning their modes of work has been carried out, which are capable in real time to adapt to the changes in loading, as well as to the current situation in the supplying electric system. Estimation methods of realization an error and convergence of iterative regulation algorithms have been advanced. The dynamics estimation for the regulation process on computer model that has confirmed the stability and high speed of convergence of a regulator has been fulfilled. The developed mathematical models of the regulated synchronous drives

are realized as regulators of engines excitation process. It has allowed to increase efficiency of their operation by (8-12) %.

Key words: the synchronous engine, process of regulation, a current of excitation, factor of capacity, a regulator, algorithm, synthesis, an error, mathematical model.