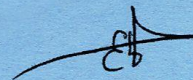


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

БАНСВ ЄВГЕН ФЕДОРОВИЧ



УДК 621.3.072.86

**ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИЙ
ЕЛЕКТРОПРИВОД ЕСКАЛАТОРА МЕТРОПОЛІТЕНУ
З ФАЗЗИ РЕГУЛЯТОРОМ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Далека Василь Хомич,
Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова,
завідувач кафедри електричного
транспорту

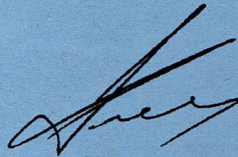
кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
доцент кафедри автоматизованих систем
електричного транспорту

Захист відбудеться « 19 » грудня 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 14 » листопада 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з найважливіших ланок технологічного процесу метрополітену є ескалатор, який разом з метропоїздом відтворює єдину систему переміщення пасажирів під землею. Електропривод ескалаторів метрополітену споживає приблизно половину потужності підведеної напруги до шин 380 В, тому енергоресурсозберігаючий аспект його роботи має важливе значення. При цьому окрім прямої економії електроенергії слід мати на увазі й ту економію, яка за рахунок удосконалення управління може забезпечити зниження зносу механічного та електричного обладнання, та, відповідно, й тих енергетичних та матеріальних ресурсів, які були б потрібні на його заміну під час проведення ремонтних робіт.

Характерною особливістю електропривода ескалатора являється суттєво змінний характер навантаження. Зниження навантаження вдень та особливо пізно увечері доходить до $5 \div 10$ % від номінального. В той же час потужність приводного двигуна, згідно з нормативними документами, обирається в 2 рази більшою максимально можливого навантаження ескалатора. У наслідок цього на протязі більшої частини часу електропривод ескалатора працює в режимах значного недовантаження, для яких характерний низький ККД, тобто, є суттєві резерви прямої економії електричної енергії. Переключення релейно-контакторної апаратури, на основі якої виконана система управління більшої частини ескалаторних установок, що експлуатуються, прямий пуск приводного двигуна який викликає електричні та механічні ударні навантаження, прискорюють знос обладнання. Їх виключення може стати додатковим фактором енергоресурсозбереження за рахунок економії енергетичної складової під час ремонтних робіт, а також під час видобування сировини, виробництві матеріалів, необхідних для виготовлення запасного обладнання.

Таким чином науково-технічна задача - розробка енергоефективного електроприводу для маловитратної модернізації ескалаторів метрополітенів є актуальною, яка визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХП» відповідно до плану науково-дослідних робіт МОН України у рамках держбюджетних тем: «Розробка систем енергозберігаючого електропривода з інтелектуальним керуванням» (ДР № 0111U002271) та «Розробка дослідного зразка енергоресурсозберігаючого джерела електричної енергії для систем газотранспортування» (ДР № 0109U002397), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів та пов'язана із замовленням КП «Харківський метрополітен» (Договір № 99-05/МОЗ).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка та дослідження простого, надійного, енергоресурсозберігаючого електроприводу для маловитратної модернізації існуючих електроприводів ескалаторів метрополітену, спроможного адаптуватися до існуючих систем управління рухом, автоматизації, захисту та діагностики.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- визначити принципи маловитратної модернізації електроприводів існуючих ескалаторних установок спроможних забезпечити енергоресурсозберігаючий ефект з максимальним використанням встановленого обладнання;
- розробити функціональну схему енергоресурсозберігаючого електропривода з мікропроцесорним керуванням;
- визначити критерій мінімізації втрат електричної енергії;
- встановити доцільність інтелектуального керування на базі фаззи регулятора;
- розробити закон управління, що забезпечує мінімум втрат в електроприводі ескалатора метрополітену;
- побудувати математичну та комп'ютерну моделі електропривода ескалатора метрополітену виконаного за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з фаззи регулятором;
- виконати комп'ютерне моделювання, проаналізувати часові діаграми електромеханічних та електромагнітних процесів, зробити висновки щодо працездатності та техніко-економічної ефективності запропонованої системи електроприводу ескалатора метрополітену.

Об'єкт дослідження – статичні, динамічні та енергетичні процеси в електроприводі ескалатора метрополітену.

Предмет дослідження – система керування електроприводом ескалатора метрополітену виконаного за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун», яка забезпечує мінімізацію струму статора.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувались методи аналізу і синтезу – для обґрунтування принципів маловитратної модернізації ескалаторних установок та розробки функціональної схеми електроприводу. Розробка закону управління електроприводом ескалатора здійснювалась на підставі методів теорії нечітких множин з використанням алгоритму Мамдані. Розрахунок динамічних процесів в розробленій комп'ютерній моделі виконувався за допомогою явних та неявних чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь (Dormand-Prince, stiff/TR-BDF2 та інших). Методи комп'ютерного моделювання (віртуальні моделі з бібліотеки SimPowerSystems пакету MATLAB) використовувалися при розробці комп'ютерної моделі електроприводу ескалатора метрополітену.

Наукова новизна результатів:

- обґрунтовано принципи маловитратної модернізації існуючих електроприводів ескалаторів метрополітену;
- вперше показано енергоефективність фаззи регулювання електроприводом ескалатора метрополітену виконаного за системою «тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун»;
- запропоновано закон керування та виконано синтез фаззи регулятора який забезпечує мінімізацію струму статора та втрат асинхронного двигуна.
- доведено доцільність використання для мінімізації втрат ескалатора метрополітену фаззи регулятора з двома входами за зміною струму та напруги

ги статора асинхронного двигуна та трьома термами в кожному з них;

- побудовано повну математичну та комп'ютерну моделі роботи електропривода ескалатора з фаззі регулятором, із урахуванням властивостей тиристорного регулятора та імпульсного характеру напруги живлення електродвигуна;

- виконано комп'ютерне моделювання динамічних та статичних режимів роботи розробленої системи електроприводу, проаналізовано його результати та показано, що в умовах роботи ескалатора модернізація шляхом виконання електропривода за системою тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун з фаззі регулятором може забезпечити економію електроенергії до 15 %.

Практичне значення одержаних результатів для міського електротранспорту полягає в розробці енергоефективного електроприводу ескалаторних установок, який забезпечує мінімізацію струму статора приводного двигуна та зменшення втрат електроенергії, а також збільшує термін роботи обладнання за рахунок усунення електричних та механічних ударів при пусках.

Результати і висновки дисертаційної роботи дозволяють модернізувати існуючі електроприводи ескалаторів метрополітену з мінімальними витратами на переобладнання. Вироблені рекомендації по заміні існуючих електроприводів ескалаторів з релейно-контакторною системою керування на електроприводи за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з фаззі регулятором.

Результати проведених досліджень передані для впровадження на КП «Харківський метрополітен» (м. Харків), що дозволить зменшити споживання електроенергії ескалаторними установками.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХПІ» при проведенні занять зі спеціалістами та магістрами за дисциплінами «Спеціальний курс по теорії та практиці електроприводу» та «Діагностика та наладка автоматизованих електроприводів».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати, наведені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: вирішення науково-прикладної задачі розроблення енергоресурсозберігаючого електроприводу для модернізації ескалаторних установок метрополітену; обґрунтування критерію оптимізації втрат у якості регулювання за мінімумом струму статора, що забезпечує зменшення втрат електроприводу близько до мінімальних; обґрунтування структури фаззі регулятора виконаного з двома входами – струму та напруги статора асинхронного двигуна та трьома термами в кожному з них; розроблення бази правил логічної обробки фаззі регулятором для керування електроприводом ескалатора, який забезпечує зменшення втрат електричної енергії.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу».

Теорія і практика» (смт. Миколаївка, 2007–2008 рр., м. Алушта, 2009 р., м. Одеса, 2011 р.) та «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2008 р.); на Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010-2011 рр.) та на наукових семінарах НАН України «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» (м. Харків, 2008 – 2013 рр.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані в 7 наукових працях, з яких 5 у фахових наукових виданнях України, 2 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатку. Повний обсяг дисертації складає 140 сторінок, з них: 55 рисунків та 5 таблиць по тексту; 24 рисунки на 12 сторінках; 1 таблиця на 1 сторінці; список використаних джерел з 65 найменувань на 7 сторінках; додаток на 3 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, викладена наукова новизна, наведено дані про апробацію та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено аналізу електроприводів існуючих ескалаторних установок та технологічних особливостей їх роботи. Проведено співставлення сучасних способів підвищення енергоефективності електроприводу ескалатора, наведено їх недоліки та переваги. На підставі виконаного аналізу сформульовані задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** обґрунтовано принципи маловитратної модернізації існуючих ескалаторних установок метрополітену, проведено вибір системи керування та способу регулювання, обґрунтовано критерій мінімізації втрат приводного двигуна ескалатора, а також розроблено функціональну схему енергоресурсозберігаючого електроприводу ескалатора метрополітену.

Аналіз статистичних даних пасажиропотоку та результатів замірів споживаної активної і реактивної електроенергії ескалаторних установок отриманих під час проведення енергетичного аудиту на КП «Харківський метрополітен» свідчить, що навантаження приводних двигунів ескалаторів метрополітену у часи «пік» не перевищує 20 %, а більшість часу вони працюють з навантаженням яке не перевищує 10 %. Визначено, що таке значне недовантаження пов'язане, в значній мірі з вибором потужності двигуна, яка встановлюється за максимально можливим завантаженням виходячи з того, що на кожній сходинці робочої ланки ескалаторного полотна може знахо-

дяться одночасно дві людини вагою 80 кг. Крім того, враховуючи високі вимоги щодо надійності й безпечної роботи які висуваються до даного механізму, коефіцієнт запасу за потужністю згідно з нормативними вимогами повинен бути не менше 2. При такому значному недовантаженні приводний двигун ескалатора працює з низькими енергетичними показниками. Покращити енергетичні характеристики асинхронних двигунів у недовантаженому режимі роботи можна за рахунок регулювання напруги статора за допомогою напівпровідникових перетворювачів. Проведено аналіз таких перетворювачів як тиристорний регулятор напруги (ТРН) та перетворювач частоти (ПЧ), наведено переваги та недоліки кожного з них.

Проведений аналіз дозволив сформулювати наступні принципи маловитратної модернізації існуючих ескалаторних установок метрополітену:

- електропривод ескалатора при модернізації доцільно виконувати регульованим на основі системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун», побудованої на вітчизняних силових тиристорах;

- мінімізацію втрат в електроприводі слід виконувати за рахунок погодження навантаження та напруги приводного двигуна ескалатора;

- для зменшення витрат на модернізацію електроприводів ескалаторів можливе збереження основного силового електрообладнання;

- систему керування модернізованого електроприводу доцільно виконати на базі мікропроцесора, що дозволить узгодити систему керування ескалаторною установкою з існуючими комп'ютерними системами керування рухом.

Виходячи з принципів маловитратної модернізації, дослідженні існуючі електроприводи які побудовані за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун», та дозволяють підвищити енергетичні характеристики роботи недовантаженого асинхронного двигуна за різними критеріями мінімізації втрат електричної енергії.

Оптимізувати втрати у електроприводі можливо підтримуючи швидкість обертання АД на рівні оптимального ковзання S_{opt} . При мінімізації втрат електроприводу оптимальне ковзання S_{opt} визначається відповідно з формулою

$$S_{opt} = \frac{R_2' \sqrt{(X_\mu^2 / R_\mu + R_1) / (R_2' + R_1)}}{X_{к.з.}}, \quad (1)$$

де R_1, R_2' - активний приведенний опір статора та ротора АД відповідно; R_μ - активний опір контуру намагнічування АД; $X_\mu, X_{к.з.}$ - реактивний опір контуру намагнічування та короткого замикання АД відповідно.

При максимізації коефіцієнту потужності асинхронної машини значення оптимального ковзання S_{opt} визначається відповідно до формули

$$S_{opt} = \frac{R_2'(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\mu X_{кз}})}{X_\mu X_{кз}}. \quad (2)$$

Найбільш раціональним методом оптимізації для електроприводу ескалатора, при якому не потребується використання додаткових датчиків для вимірювання швидкості є критерій мінімуму струму статора АД. Для кожного значення моменту опору навантаження при постійній швидкості обертання існує оптимальний режим роботи, який характеризується мінімальним струмом що споживається АД (лінія АВ на рис.1), що дозволяє мінімізувати втрати електричної енергії, контролюючи лише два параметри електроприводу – струм та напругу.

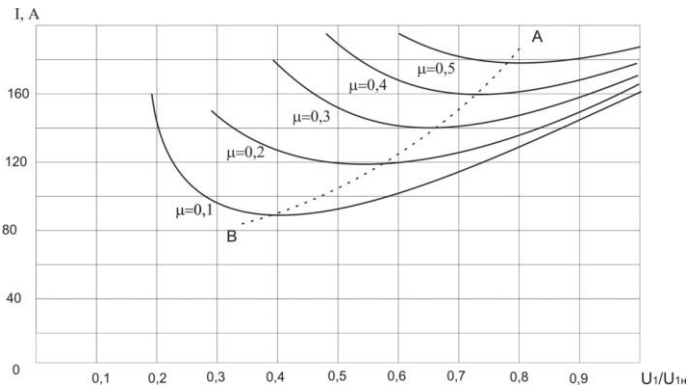


Рис.1. U-образні характеристики при регулюванні напруги статора АД

Співставлення різних критеріїв мінімізації та способів керування привели до висновку доцільності розробки функціональної схеми енергоресурсозберігаючого електроприводу ескалатора метрополітену за системою ТРН-АД з фаззі регулятором (рис.2).

Функціональна схема, яка представлена на рис. 2, дозволяє зменшити втрати електроприводу ескалатора шляхом мінімізації струму статора АД за рахунок регулювання напруги. Тиристорний регулятор напруги, який складається з десяти тиристорів VS1-VS10, що включені попарно зустрічно-паралельно у кожен фазу, регулює напругу статора АД, завдяки регулюванню кута відкриття тиристорів $\alpha_{кер}$ системою імпульсно-фазового керування (СІФК). Фаззі регулятор за сигналами з датчиків струму ДС і напруги ДН, згідно з U-образними характеристиками (рис.1), змінює кут відкриття $\alpha_{кер}$, регулюючи тим самим напругу в залежності від навантаження електроприводу.

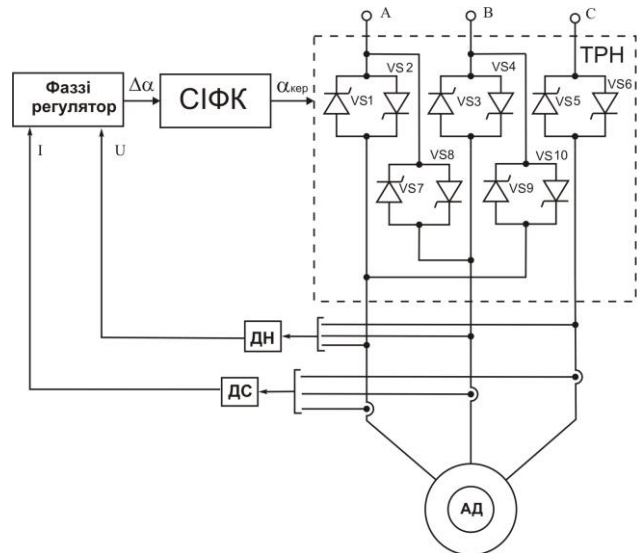


Рис.2. Функціональна схема електроприводу ескалатора

Третій розділ присвячено синтезу фаззі регулятора. Використання фаззі логіки в керуванні електроприводами дає можливість будувати енергоефективні системи без застосування громіздкого математичного опису режимів роботи електромеханічних систем. Електропривод ТРН-АД є нелінійною системою із взаємозв'язаними електромагнітними процесами в обмотках АД, тому врахування впливу електрорушійної сили у безструмових інтервалах на напругу та струм в сусідніх фазах ускладнює розрахунок. Нечіткі моделі є простішими для апаратної реалізації порівняно з класичними алгоритмами керування.

Для реалізації алгоритму пошуку мінімуму струму статора АД згідно з U-образними характеристиками (рис.1), фаззі регулятор повинен оцінювати зміну струму ΔI та напруги ΔU на кожному кроці розрахунку для чого треба мати можливість за-

Фаззі регулятор

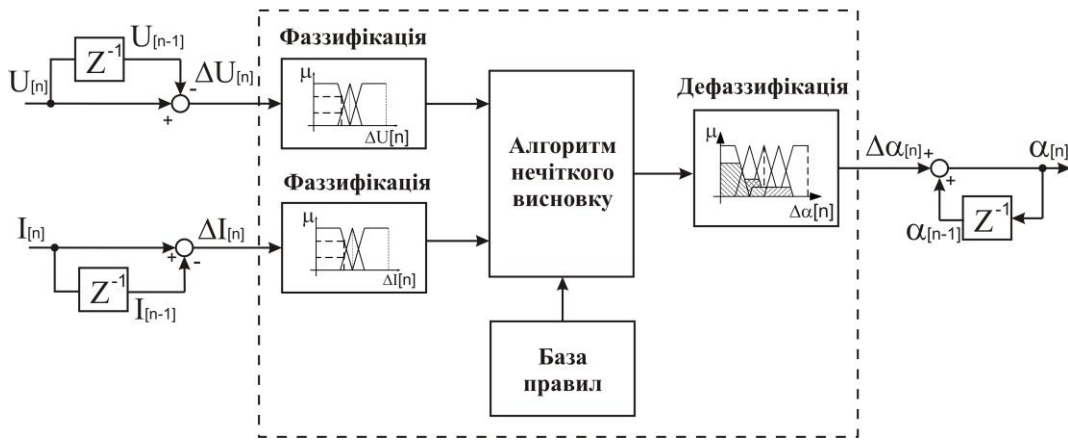


Рис. 3. Структурна схема фаззі регулятора

пам'ятовування значень струму і напруги для минулого інтервалу вимірювання цих величин. На рис. 3 зображена запропонована структурна схема до якої введено блоки одиничної дискретної затримки z^{-1} для розрахунку вхідних значень фаззі регулятора ΔI та ΔU та значення корегування кута керування тиристорами $\Delta\alpha$.

У загальному випадку синтез фаззі регулятора передбачає наступну послідовність визначення параметрів операцій нечіткої логіки:

- встановлення параметрів фаззифікації;
- створення бази правил та вибір алгоритму нечіткого висновку;
- встановлення параметрів дефаззифікації.

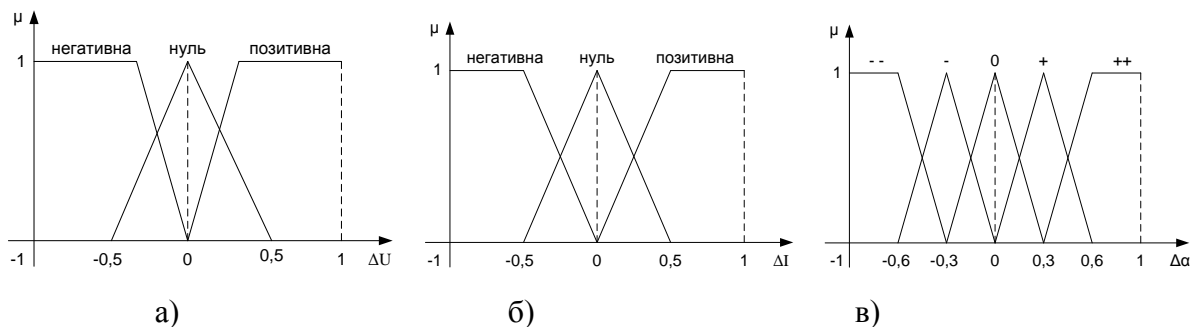


Рис. 4 Вхідні та вихідні терми фаззі регулятора

Для фаззифікації вхідних величин – зміни струму ΔI та напруги ΔU , виходячи з мінімізації кількості правил логічної обробки та для спрощення синтезованого регулятора, визначено по три терми, параметри та вид яких зображено на рис.4а,б. Для вихідної змінної $\Delta\alpha$ для забезпечення плавності регулювання встановлено п'ять термів (рис.4,в).

Базу правил розроблено виходячи з задачі оптимізації енергоспоживання електродвигу шляхом знаходження мінімуму струму статора на основі залежності струму статора АД від напруги (рис. 5) наступним чином.

Припустимо в вихідному положенні при моменті опору M_{c1} точка, що характеризує режим роботи ЕП відповідає точці $C1$ на характеристиці I . В наслідок, заходу пасажирів на ескалатор момент навантаження збільшиться до значення M_{c2} . Даному навантаженню для сталого режиму відповідає характеристика II на рис.5. Ця зміна навантаження призведе до збільшення струму, значення якого буде визначатися точкою $C2$ на характеристиці II при тому ж значенні напруги живлення статора, тобто значення зміни напруги $\Delta U = \text{«нуль»}$, а зміна струму буде позитивною $\Delta I = \text{«позитивна»}$. При цьому, слід врахувати те, що зменшення напруги живлення АД при збільшенні навантаження може призвести до того, що електромагнітний момент стане меншим моменту навантаження та двигун може опрокинутися. Таким чином, за даних умов ($\Delta U = \text{«нуль»}$ та $\Delta I = \text{«позитивна»}$) фаззі регулятор повинен видати сигнал на збільшення напруги, то б то зменшення кута керування $\Delta \alpha = \text{«-»}$. Виходячи з вищесказаного, запропоновано одне з правил

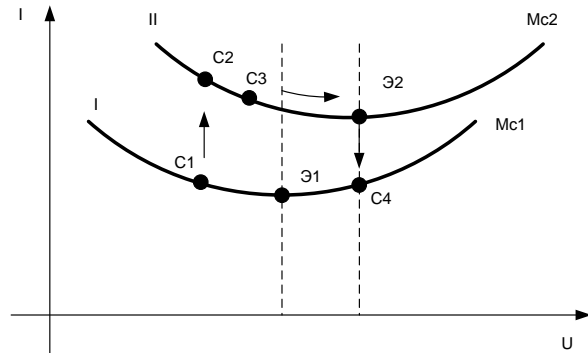


Рис. 5. До пояснення алгоритму роботи фаззі регулятора

$$\text{Якщо } \Delta U \in \text{«нуль»} \text{ і } \Delta I \in \text{«позитивна»}, \text{ то } \Delta \alpha \in \text{«-»}. \quad (4)$$

Негативна зміна кута керування $\Delta \alpha$ призведе до збільшення напруги статора та зменшення струму, робоча точка зміститься до $C3$. Таким чином, для наступного кроку вхідними значеннями фаззі регулятора будуть $\Delta I = \text{«негативна»}$, $\Delta U = \text{«позитивна»}$. Для продовження руху робочої крапки до екстремуму $\text{Э}2$ прирощення $\Delta \alpha$ на цьому кроці повинно бути негативним «-» , це призведе до зменшення кута керування α , тобто до збільшення напруги. Для всіх наступних розрахунків прирощення напруги повинні бути позитивними $\Delta U = \text{«позитивна»}$, а струму негативними $\Delta I = \text{«негативна»}$, що змусить робочу точку рухатися по характеристиці II у напрямі до $\text{Э}2$. На основі даних міркувань визначено наступне правило

$$\text{Якщо } \Delta U \in \text{«позитивна»} \text{ і } \Delta I \in \text{«негативна»}, \text{ то } \Delta \alpha \in \text{«--»}. \quad (5)$$

По мірі наближення до мінімуму струму, зміни вхідних величин фаззі регулятора ΔU та ΔI , а також вихідної $\Delta \alpha$ повинні зменшуватися, не змінюючи свого знаку, прагнучи до нуля поблизу екстремальної точки $\text{Э}2$. При досягненні мінімуму струму ($\Delta I = \text{«нуль»}$ та $\Delta U = \text{«нуль»}$) фаззі регулятор повинен завершити змінення кута керування до тих пір, поки на вході не з'явиться сигнал відмінний від нуля. Даній умові відповідає правило

$$\text{Якщо } \Delta U \in \text{«нуль»} \text{ і } \Delta I \in \text{«нуль»}, \text{ то } \Delta \alpha \in \text{«0»}. \quad (6)$$

При зменшенні навантаження ескалатора, наприклад до значення M_{cl} , робоча точка, в усталеному режимі, зміститься до характеристики I до $C4$ та до входів фаззи регулятора надійдуть негативний сигнал зміни струму ΔI «негативна» та напруги ΔU «нуль», та згідно з рис.5 фаззи регулятор повинен видати сигнал на зменшення напруги, тобто $\Delta\alpha$ «+». Таким чином наступне правило яке відповідає цій вимозі

$$\text{Якщо } \Delta U \in \text{«нуль»} \text{ і } \Delta I \in \text{«негативна»}, \text{ то } \Delta\alpha \in \text{«+»}. \quad (7)$$

Для наступного кроку, прирощення струму ΔI та напруги ΔU будуть негативними, та фаззи регулятор повинен видати сигнал на подальше збільшення кута керування $\Delta\alpha$ «++», що призведе до зменшенню напруги та наближенню робочої точки до екстремуму $\mathcal{E}I$.

Таблиця 1

База правил фаззи регулятора

ΔU \ ΔI	Негативна	Нуль	Позитивна
Негативна	++	+	--
Нуль	-	0	+
Позитивна	--	-	++

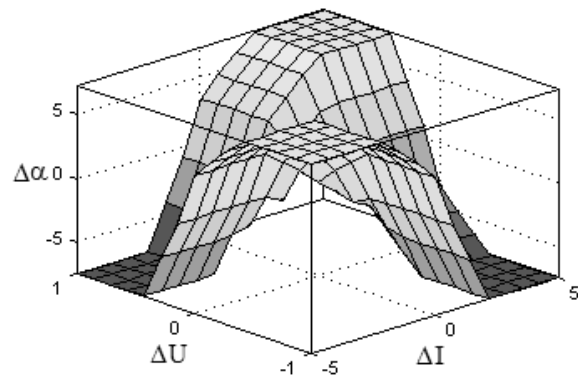


Рис. 6. Поверхня керування фаззи регулятора

Всі наступні зміни вхідних величин будуть негативними, а робоча точка буде рухатися по характеристиці I в сторону екстремуму $\mathcal{E}I$. Тобто наступне правило

$$\text{Якщо } \Delta U \in \text{«негативна»} \text{ і } \Delta I \in \text{«негативна»}, \text{ то } \Delta\alpha \in \text{«++»}. \quad (8)$$

Створені правила логічної обробки (4-8) представлені у табл. 1, а поверхня керування фаззи регулятора зображена на рис.6.

Для дефазифікації визначено метод центроїду згідно якого $\Delta\alpha$ розраховується за формулою

$$\Delta\alpha = \frac{\int_{\min}^{\max} x \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx} \quad (9)$$

де x - значення вхідної величини (ΔU та ΔI), $\mu(x)$ – значення ступеню приналежності вхідної величини.

Четвертий розділ присвячено створенню комп'ютерної моделі розробленого еле-

ктроприводу ескалатора за системою ТРН-АД з фаззі регулятором.

При математичному описі роботи асинхронної машини використано рухому систему координат $d - q$. Диференційні рівняння для обмотки статора АД мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = R_{sr} i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} - \omega_k \sigma L_s i_{sq} - \omega_r k_r \Psi_{rq} \\ U_{sq} = R_{sr} i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rq} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + \omega_r k_r \Psi_{rd} \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rd} + (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rq} \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rq} - (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rd} \end{array} \right. , \quad (10)$$

де U_{sd}, U_{sq} – проєкції напруги статора на вісі d та q відповідно; i_{sd}, i_{sq} – проєкції струму статора на вісі d та q відповідно; L_s – повна індуктивність обмотки статора; Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – проєкції потокозчеплення ротора машини на вісі d та q відповідно; L_s – головна індуктивність двигуна; T_r – електромагнітна постійна часу; ω_r, ω_k – частота обертання ротора та системи координат відповідно.

Рівняння для електромагнітного моменту представляється як

$$M = \frac{3}{2} Z_p k_r (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}) \quad (11)$$

Для врахування впливу на електромагнітні процеси в електроприводі імпульсного характеру напруги побудовано імітаційну комп'ютерну модель системи ТРН-АД з фаззі регулятором з використанням блоків бібліотеки SimPowerSystems пакету MATLAB.

Тиристор представлено як послідовне з'єднання вимикача SW, резистору R_{on} та індуктивності L_{on} , значення яких відповідають його внутрішньому активному та індуктивному опору, а також джерела постійної напруги V_f величина якої відповідає напрузі відмикання (рис. 7). Вимикач SW керується логічним сигналом в залежності від значення напруги V_{ak} , струму I_{ak} , та сигналу управління g (рис.7).

В моделі тиристора, також враховано снаберну ланку, яка з'єднується паралельно з тиристором та служить для захисту напівпровідникового пристрою.

Статична вольт-амперна характеристика, яка відображає залежність струму I_{ak} що протікає через тиристор та прикладеної напруги V_{ak} представ-

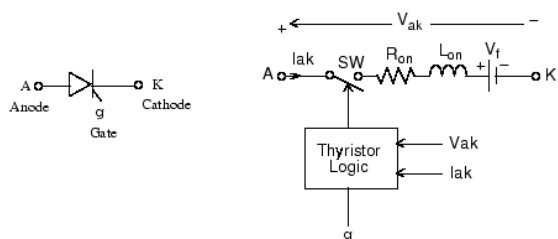


Рис. 7. Структурна схема моделі тиристора

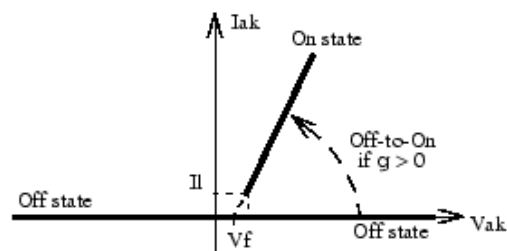


Рис. 8. Статична ВАХ моделі тиристора

леної моделі приведена на рис. 8. Тиристор вмикається, коли напруга між анодом та катодом V_{ak} стає більшою за напруги відмикання V_f та до управляючого входу подається позитивний імпульс управління ($g > 0$). При цьому тривалість імпульс-су управління повинна бути достатньою, для того щоб

дозволити струму I_{ak} стати більшим значення замикаючого струму I_f .

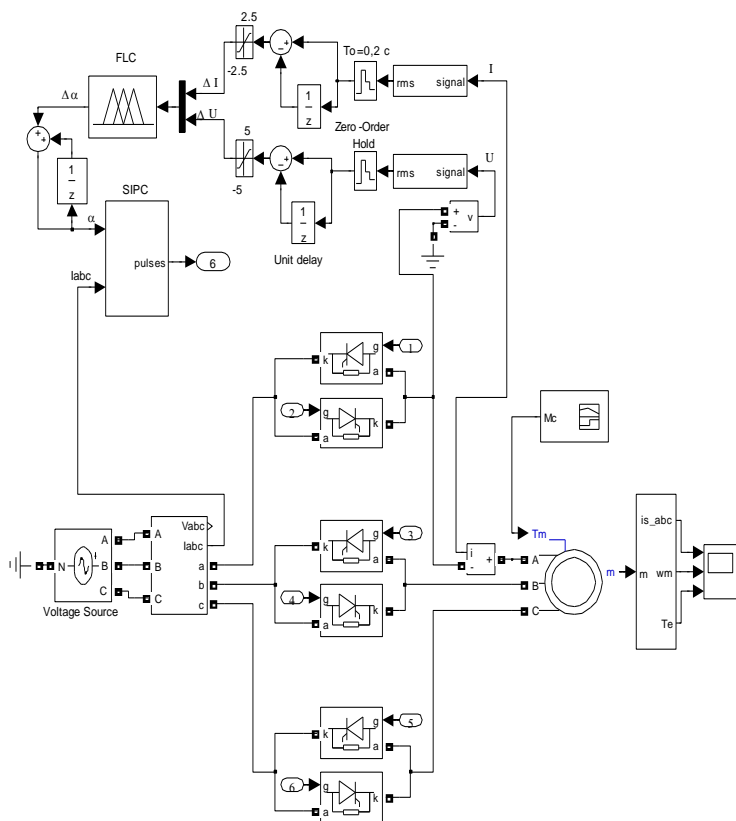


Рис. 9. Комп'ютерна модель системи ТРН-АД

Замикання тиристора відбувається тоді, коли струм, що протікає через прилад, стане рівним нулю ($I_{ak}=0$) та напруга V_{ak} стане негативною як мінімум на протязі періоду часу, який дорівнює часу виключення T_q . Значення T_q відповідає часу відновлювання замикаючих властивостей тиристора. Якщо напруга V_{ak} , стане позитивною в межах періоду часу меншого за T_q , тиристор увімкнеться автоматично, навіть якщо управляючий сигнал буде дорівнювати нулю ($g=0$), а значення струму не перевищуватиме замикаючого

струму I_f . До того ж, якщо під час включення тиристора, амплітуда струму, що протікає через тиристор I_{ak} залишиться, нижче рівня I_f , тиристор вимкнеться тільки після того, як рівень управляючого сигналу стане дорівнювати нулю ($g=0$).

Представлена комп'ютерна модель роботи тиристора повністю імітує

його фізичні властивості враховуючи всі основні параметри напівпровідникового приладу. Розроблена повна імітаційна модель ЕП наведена на рис. 9.

У п'ятому розділі виконано комп'ютерне моделювання робочих режимів, проведено аналіз часових діаграм, усталених режимів роботи під навантаженням та перехідних режимів:

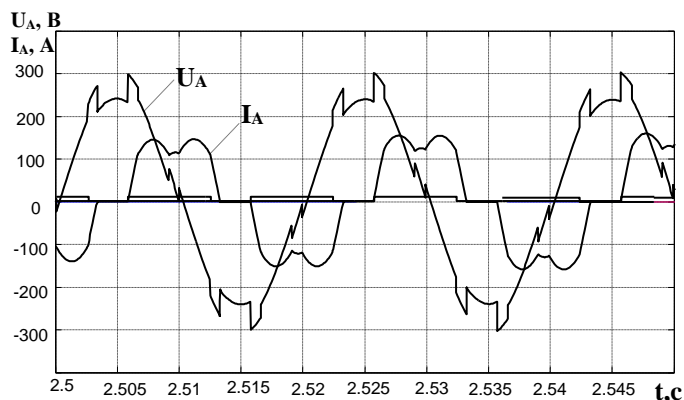
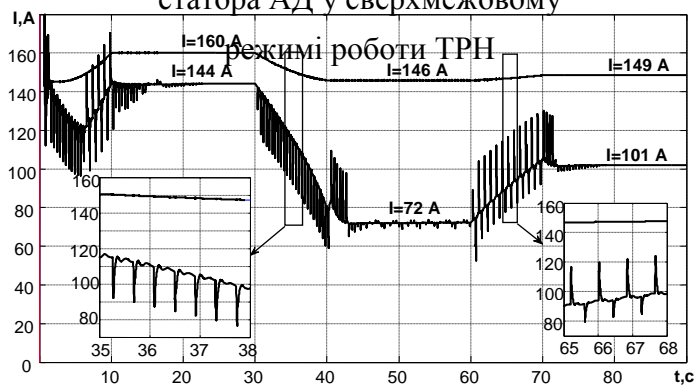


Рис. 10. Часові діаграми струму і напруги фази А



Рис. 11. Часові діаграми струму і напруги фази А статора АД у Domeжовому режимі роботи ТРН



та регулюванні напруги, струм АД в усталених режимах при роботі

режимів: завантаження, розвантаження електропривода ескалатора за системою ТРН-АД. Результати моделювання наведені на рис.10-15.

На рис. 10 надані часові діаграми струму та напруги фази статора АД при роботі електроприводу у Domeжовому режимі, а на рис.11 у сверхмежовому режимі. На представлених часових діаграмах видно, що електрорушійна сила у безструмових паузах на ділянках провідності створює напругу на обмотках двигуна, збільшуючи її у першій половині та зменшуючи у другій. Характер часових діаграм, наведених на рис. 10,11, повністю відповідає фізиці процесу регулювання напруги ТРН та співпадає з осцилограмами відомими з технічної літератури, що підтверджує адекватність розробленої комп'ютерної моделі, а також можливість використання її для дослідження електроприводу розробленого в дисертаційній роботі.

На рис. 12 наведено часові діаграми змінення струму статора АД при моделюванні режимів завантаження і розвантаження електроприводу з фазі регулятором, що функціонує за розробленим алгоритмом. З діаграм рис.12 видно, що при роботі

електроприводу з навантаженням $M_c=0,4M_n$ (інтервал часу $t=10-30$ с) зменшився до $I=144$ А, а при зменшенні навантаження ескалатора до $M_c=0,1M_n$ (інтервал часу $t=40-60$ с) струм зменшився до $I=72$ А, що більше ніж у 2 рази у порівнянні з нерегульованим електроприводом ($I=146$ А). У перехідних режимах (інтервали часу $t=0-10$ с, $t=30-40$ с та $t=60-70$ с) помітні викиди струму які пов'язані з регулюванням напруги.

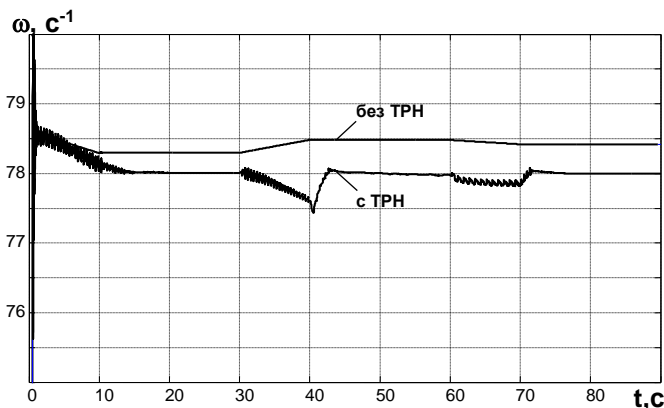


Рис. 13. Часові діаграми швидкості обертання АД

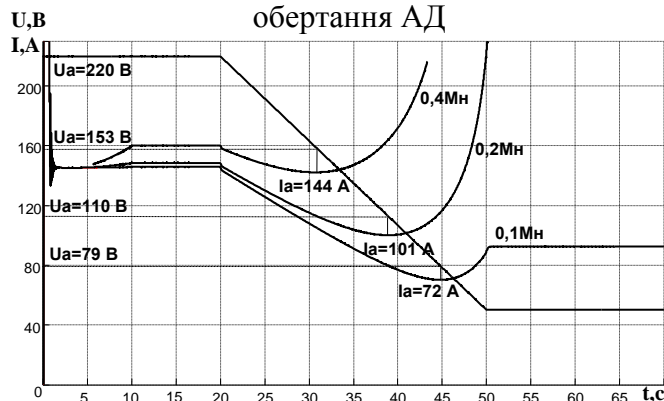


Рис. 14. Змінення струму АД при плавному зменшенні напруги статора

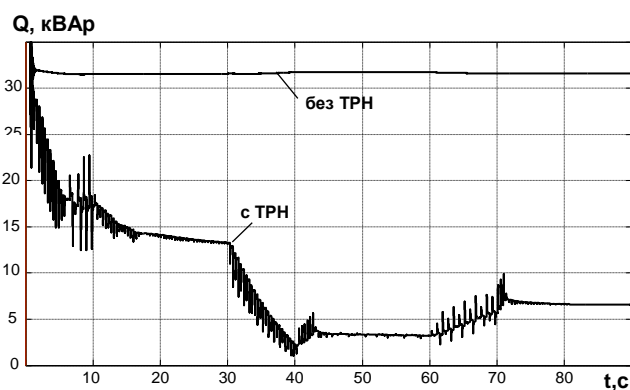


Рис. 15. Часові діаграми реактивної

реактивна потужність значно зменшується. Для навантаження $M_c=0,1M_n$ ($t=40-60$ с) значення реактивної потужності зменшилось більш ніж у 6 разів з 27 кВАр до 4 кВАр.

70 с) помітні викиди струму які пов'язані з регулюванням напруги. Як видно з часових діаграм, представлених на рис. 13, викиди струму майже не впливають на швидкість обертання АД, що є наслідком механічної інерційності електроприводу. Рис. 13 свідчить, що в усталених режимах роботи, не дивлячись на зміну навантаження електроприводу, швидкість обертання АД залишається на одному рівні. Це підтверджує те, що електропривод працює в оптимальному режимі з постійним ковзанням $S=S_{opt}$.

Для підтвердження адекватності роботи фазі регулятора й визначення значень мінімуму струму статора АД для навантажень $M_c=0,4M_n$, $M_c=0,2M_n$, $M_c=0,1M_n$ модулювалося плавне зменшення напруги (рис. 14). Як видно мінімальні значення струмів співпадають зі значеннями струмів в усталених режимах роботи електроприводу з фазі регулятором (рис.12).

На рис. 15 наведено часові діаграми реактивної потужності що споживається АД. Діаграми показують, що при регулюванні напруги

Комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність розробленого електроприводу з фаззі регулятором.

Для підтвердження отриманих результатів, були проведені випробування на створеному лабораторному стенді. Схема лабораторної установки надана на рис. 16. До схеми входить наступне обладнання: QF– автоматичний вимикач А3163УЧ, М1–асинхронний двигун з фазним ротором типу МТФ-311-6, $n_H=945$ об/хв, $P_H=11$ кВт; М2–двигун постійного струму типу П2, $n_H=1460$ об/хв, $P_H=15$ кВт; R1– резистор типу НФ $R=4.1$ Ом; R2–

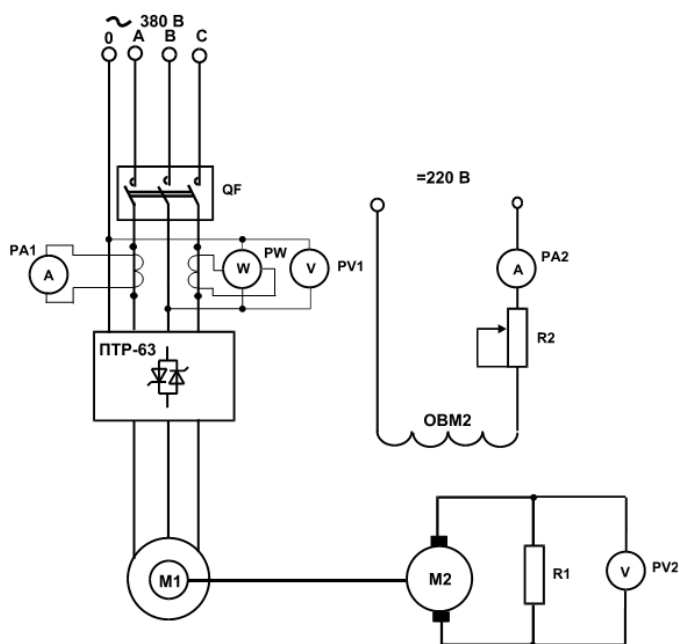


Рис. 16. Схема лабораторного стенду

резистор для обмотки збудження типу РСП $R+R=150+165$ Ом; PV1– вольтметр магнітоелектричної системи зі шкалою 0-250 В типу М367; PV2 – вольтметр магнітоелектричної системи зі шкалою 0-150 В, типу М309; PA1– амперметр електромагнітної системи зі шкалою 0-5 А, класу точності 1,5; ТТ- трансформатор струму типу Т-0,66У3 50/5 Кл.0,5, 5 VA; PW - прецизійний електродинамічний ватметр типу 434381/500 Кл.0,5; ПТР - пускач тиристорний регульований типу ПТР-63 (виготовлений в НТУ «ХПІ»).

Момент на валу АД М1 створювався за допомогою машини М2 шляхом зміни магнітного потоку резистором R2. Потужність М1 контролювалася шляхом виміру напруги за допомогою вольтметра PV2, та визначалася розрахунковим шляхом за відомою формулою $P=U^2_{R1}/R1$.

Для контролю потужності, що споживається від мережі використовувався ватметр PW, трансформатор струму ТТ та комбінаційний прибор типа Ц4353. PV1 вимірював вхідну фазну напругу.

Таблиця 2

Результати лабораторного експерименту

P_H Вт	1400	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
I_{S1} А	18,7	18,9	19	19,2	19,4	19,6	20,2	20,4
P_1 Вт	3636	3780	4230	4680	5148	5670	6120	6498
S_1 ВА	12308	12440	12505	12637	12767	12900	13295	13427
Q_1 Вар	11759	11852	11768	11738	11685	11587	11803	11750

I_{S2} A	8	8,2	10,5	10,9	11,6	14,3	14,6	15,5
P_2 Вт	2340	2340	3060	3600	4140	4860	5400	6120
S_2 ВА	5265	5397	6911	7174	7635	9412	9609	10202
Q_2 Вар	4716	4863	6197	6205	6415	8060	7948	8162

Результати лабораторних випробувань приведені у табл. 2. Видно, що при навантаженні $M_c=0,15M_n$ струм статора зменшився з 18,7 А до 8 А, а активна потужність з 3,64 кВт до 2,34 кВт.

Отримані результати підтверджують можливість економії електроенергії ескалаторами метрополітену при виконанні електроприводу по системі ТРН-АД з фаззі регулятором та керуванням за мінімумом струму статора.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки та дослідження енергоресурсозберігаючого електропривода ескалатору метрополітену з фаззі регулятором, який забезпечує мінімізацію втрат електричної енергії до 15%, зменшення реактивної потужності в 4 – 6 разів та підвищення коефіцієнту потужності ескалаторної установки.

Найбільш вагомими науковими та практичними результатами, висновками та рекомендаціями полягають у наступному:

1. Обґрунтовано принципи маловитратної модернізації електроприводів існуючих ескалаторних установок метрополітену, які забезпечують енергоресурсозберігаючий ефект, а саме:

- електропривод ескалатора при модернізації доцільно виконувати регульованим на основі системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» побудованого на вітчизняних силових тиристорах;

- мінімізацію втрат в електроприводі доцільно виконувати за рахунок погодження навантаження та напруги приводного двигуна ескалатора;

- при модернізації електроприводів ескалаторів доцільно збереження основного силового електрообладнання;

- система керування модернізованого електропривода доцільно виконати здійснити на базі мікропроцесора, що дозволить просто узгодити систему електропривода ескалатора з існуючими комп'ютерними системами керування рухом.

2. Розроблено функціональну схему енергоресурсозберігаючого електроприводу ескалатора метрополітену за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з фаззі регулятором.

3. Визначено критерій оптимізації режиму роботи електроприводу у якості мінімуму струму статора асинхронного двигуна, який забезпечує зниження втрат електричної енергії.

4. Обґрунтовано вибір кількості та вид входних та вихідних термів фаззі регулятора, виконано синтез фаззі регулятора з двома входами – зміни напруги живлення та струму статора та запропоновано закон керування, який забезпечує мінімізацію струму статора асинхронного двигуна.

5. Побудовано математичну та комп'ютерні моделі електропривода ескалатора ме-

трополітену за системою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з фаззи регулятором, та виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних та електромеханічних процесі в розробленому електроприводі. Підтверджено адекватність функціонування синтезованого фаззи регулятора методом комп'ютерного моделювання. Створено лабораторний стенд та виконані експериментальні дослідження.

6. Результати досліджень передані для впровадження на КП «Харківський метрополітен» для використання при модернізації існуючих ескалаторних установок, а також впроваджені в навчальний процес кафедри автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Банев Е.Ф. К выбору типа энергоресурсосберегающего электропривода для эскалатора метрополитена / В.Б. Клепиков, В.И., Колотило Е.Ф. Банев, В.П. Филиппович // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: – НТУ „ХП”. – 2008. – вип. 30. – С. 486-488.

Здобувачем запропоновано використання при модернізації існуючих електроприводів ескалаторних установок електроприводу за системою «Тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун».

2. Банев Е.Ф. Синтез фаззи регулятора для енергосберегающего электропривода эскалатора метрополитена / В.Б. Клепиков, Е.Ф. Банев // Електроінформ. – Львів: Екоінформ. – 2009. – Тематичний вип. – С. 425 – 427.

Здобувачем проведено синтез фаззи регулятора.

3. Банев Е.Ф. К оценке энергоэффективности использования электропривода по системе ТПН – АД для эскалаторов метрополитена / В.Б. Клепиков, С.А. Мехович, Е.Ф. Банев // Энергозбереження. Энергетика. Энергоаудит. – Харків: ТОВ «Північно-східна енергетична компанія «СВЕКО». – 2009. – №9 (67). – С.16-20.

Здобувачем проведено оцінку енергоефективності при модернізації існуючих електроприводів ескалаторів метрополітену використання системи тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун.

4. Банев Е.Ф. Энергосберегающее FUZZY управление электроприводом эскалатора метрополитена системы ТПН –АД / В.Б. Клепиков, Е.Ф., Банев, С.А. Мехович // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХП”. – 2010. – вип. 28. – С. 579-582.

Здобувачем запропоновано закон керування електроприводом.

5. Банев Е.Ф. Моделирование энергосберегающего электропривода эскалатора метрополитена с фаззи управлением / Е.Ф.Банев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012, вип. 3/(19). – С. 533 – 536.

6. Банев Е.Ф. Моделирование энергосберегающего электропривода метрополитена

по системе тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель с фазы регулированием / В.Б. Клепиков, Е.Ф. Банев // Матеріали Міжнар. наук-практ. конф. [«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»], (Харків, 12-14 трав. 2010 р.) / М-во освіти і науки України, НТУ «ХП» [та ін.]. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – Ч.2. – С.164.

Здобувачем запропоновано спрощену математичну модель для моделювання електроприводу за системою «Тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» з фаззі регулятором.

7. Банев Е.Ф. Оптимизация потерь энергии в системе тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель с fuzzy регулированием / В.Б. Клепиков, Е.Ф. Банев // Матеріали Міжнар. наук-практ. конф. [«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»], (Харків, 1-3 черв. 2011 р.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУ «ХП» [та ін.]. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – Ч.2. – С.134

Здобувачем запропоновано для оптимізації втрат електроенергії в електроприводі мінімізувати струм статору асинхронного двигуна.

АНОТАЦІЇ

Банев Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалатора метрополітену з фаззі регулятором. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі розробки та дослідженню енергоресурсозберігаючого електропривода для маловитратної модернізації існуючих ескалаторних установок метрополітену.

В роботі обґрунтовані принципи маловитратної модернізації електроприводів ескалаторів. Розглянуті різні критерії мінімізації втрат електроенергії та способи регулювання асинхронних електроприводів визначені їх недоліки, та переваги. Запропонована функціональна схема енергоефективного електроприводу ескалатора метрополітену за системою тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун з фаззі регулятором, який забезпечує зменшення втрат електроенергії за рахунок мінімізації струму статора. Обґрунтовано структуру та виконано синтез фаззі регулятора з двома входами.

Достовірність отриманих результатів підтверджено комп'ютерним моделюванням та експериментальними дослідженнями на лабораторному стенді.

Ключові слова: електромеханічні системи, електропривод ескалатора, тиристорний регулятор напруги, асинхронний двигун, фаззі регулятор.

Банев Е.Ф. Энергоресурсосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фаззи регулятором. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

В работе обосновывается целесообразность выполнения энергоресурсосберегающего электропривода для малозатратной модернизации существующих эскалаторных установок в условиях ограниченности средств метрополитенов. Определены принципы малозатратной модернизации, предложена функциональная схема и показана целесообразность использования электропривода по системе «Тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель с фаззи регулятором». Одной из особенностей предложенной функциональной схемы является использование, для снижения потерь электрической энергии фаззи регулятора, изменяющего угол отпирания тиристоров обеспечивающим уровень напряжения питания асинхронного двигателя, соответствующий минимуму потребляемого тока. Обоснована целесообразность использования в качестве входных воздействий фаззи регулятора двух легко-измеряемых координат электропривода – напряжения и тока статора приводного двигателя эскалатора и входных термов, соответствующих приращениям этих величин при изменении нагрузки.

В отличие от известных способов регулирования асинхронного двигателя, обеспечивающих улучшение его энергетических показателей в недогруженных режимах работы, предложенный способ регулирования, основанный на отслеживании изменений напряжения и тока, не зависит от изменения параметров электропривода в процессе его работы и обеспечивает минимизацию потерь во всем диапазоне изменения нагрузок эскалатора.

Разработаны правила логической обработки и предложена методика синтеза фаззи регулятора. Установлено, что при фаззификации входных переменных для обеспечения необходимой точности регулирования достаточно трех термов, при этом количество правил логической обработки уменьшается до 9. Показано влияния изменения диапазона определения входных и выходной величин на электромагнитные процессы в электроприводе и даны рекомендации по выбору их значений в зависимости от параметров асинхронного двигателя.

Разработана математическая модель исследуемой системы и компьютерная модель, учитывающая нелинейности схемы и импульсный характер протекающих электромагнитных процессов в тиристорном регуляторе. Полная компьютерная модель создана с использованием библиотеки SimPowerSystems, пакета MATLAB.

Выполнено компьютерное моделирование процессов загрузки и разгрузки эскалатора, приведены характеризующие их временные диаграммы, подтверждающие эффективность использования разработанного электропривода с синтезированным фаззи регулятором.

Теоретические положения работы проверены и подтверждены экспериментальными исследованиями на созданном лабораторном стенде.

Ключевые слова: электромеханические системы, электропривод эскалатор, тиристорный регулятор напряжения, асинхронный двигатель, фаззи регулятор.

Banev E.F. Energyefficient Electric Drive Of Escalator Metro With Fuzzy Regulators. – Manuscript.

Candidate Of Technical Science's Thesis, Specialty 05.09.03 – Electromechanical complexes and systems. – National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, 2013.

The thesis is devoted to solving scientific problems of development and research of energy saving electric drives for upgrading existing installations subway escalator. To address the problems in the sound principles of low-cost upgrade electric escalators. The different criteria to minimize energy losses and how to control asynchronous motors by their disadvantages and advantages. The proposed functional diagram of energy efficient electric escalator at subway system thyristor voltage controller - induction motor with fuzzy controller, which would reduce energy losses by minimizing the stator current. The structure and synthesis implemented fuzzy controller with two inputs that functions for Mamdani algorithm. The Department "Automated electromechanical systems" NTU "KPI" established laboratory sample electric system thyristor voltage regulator - induction motor and held his laboratory tests.

Key words: Electromechanical systems, electric drive of escalator, thyristor voltage controller, induction motor, fuzzy regulator.



Підписано до друку 24.09.2013 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний. Друк – ризографія.
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 085157

Надруковано у СПДФО Миронов М.В.
Свідоцтво ВО4 № 022953 від 31.03.1994 р.
61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3