

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кольсун В'ячеслав Анатолійович

УДК 621.314.632

СПОСОБИ ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ЕНЕРГОЄМНИХ УСТАНОВОК
З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованого електропривода Криворізького технічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сінолиций Анатолій Пилипович,
Криворізький технічний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри автоматизованого електропривода.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
Відкрите акціонерне товариство
Науково-дослідний інститут «Перетворювач»
(м. Запоріжжя),
перший заступник голови правління;

доктор технічних наук, професор
Заїка Володимир Терентійович,
Національний гірничий університет
Міністерства освіти і науки України
(м. Дніпропетровськ),
професор кафедри систем електропостачання

Захист відбудеться «___» _____ 2010 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 у Національному гірничому університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

Автореферат розісланий «___» _____ 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
кандидат технічних наук, доцент



О. О. Азюковський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Питання ресурсо- й енергозбереження сьогодні розглядаються як єдина складова при створенні та впровадженні у виробництво високоефективних засобів розподілу, перетворення та використання електроенергетичного потенціалу різними галузями народного господарства України. Особливо це стосується енергоємних виробництв (металургійної, гірничої, хімічної та інших галузей), які в технологічних циклах використовують енергоємні установки і комплекси з регульованим електроприводом, високим рівнем енергоспоживання та специфічними характеристиками навантажень (турбомеханізми, механізми прокатних станів). Серед чинників, які визначають переважну частину кількісних і якісних показників електроспоживання вказаними об'єктами, є: значна кількість встановлених асинхронних двигунів з підвищеним рівнем втрат, обумовлених свідомим завищенням їх потужності, неякісними післяремонтними характеристиками, недосконалістю та неефективністю пуско-регулюючих систем; нераціональні схемотехнічні рішення систем живлення і керування технологічними механізмами (в першу чергу прокатного виробництва) на основі електроприводу постійного струму, що характеризується наявністю та циркуляцією реактивної потужності і гармонік в енергетичних ланках мереж; використання спрощених (механічних) засобів регулювання продуктивністю поодиноких і групових турбомеханізмів при постійній швидкості двигунів змінного струму (асинхронних та синхронних). Слід зазначити, що в структурі споживачів електроенергії, наприклад, металургійного виробництва, електроприводу належить перше місце за установленими потужностями і кількісними показниками електроспоживання (60–70% від загальних показників), але за низьких якісних показників електроспоживання. Розрахунки показують, що рівень реактивної потужності в загальних мережах живлення приймачів співпадає з рівнем активної. В індивідуальних установках (наприклад, прокатний стан) реактивна потужність може перевищувати активну в 1,5–2,0 рази. Також існує велика проблема з компенсацією гармонік струму, в першу чергу, 5-ї, 7-ї, 11-ї і 13-ї безпосередньо у вузлах живлення приймачів. Окрім цього, в умовах нестабільності виробництва, що є характерним для України на цей час, виникли додаткові чинники: непередбачуваність і нестабільність об'ємів виробництва, програм та технологічних навантажень, що збільшує число пусків і зупинок (до 10–15 на місяць) установок і комплексів великої потужності; безперервна зміна складових потужності (включно з неактивними) в окремих ланках і в цілому систем живлення; відсутність ефективних способів і заходів активного впливу на процеси формування енергобалансу з мінімальними непродуктивними втратами.

Тому розвиток способів розрахунку енергетичних показників, розробка схемотехнічних рішень щодо підвищення енергетичної ефективності систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом є актуальною науковою задачею.

Наукова задача дисертаційної роботи полягає у підвищенні енергоефективності систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом за рахунок вдосконалення прийомів аналізу і розрахунків

вказаних енергетичних показників зі змінними і ударно-циклічними навантаженнями із залученням для опису несинусоїдних та нестабільних енергопроцесів методу структурно-аналітичного моделювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до регіональної науково-технічної програми «Енерго- та ресурсозбереження». Матеріали дисертаційної роботи використані при виконанні:

- науково-дослідної роботи «Комплексне дослідження енергетичних та експлуатаційних режимів енергоємних установок технологічних ланок НКГЗК КДГМК «Криворіжсталь» та розробка технічних рішень по зниженню рівня електроспоживання ними та підвищенню експлуатаційних показників» (договір №3049 (№ 19-404-02) від 16.07.2002, номер державної реєстрації 0102U006889);

- науково-дослідної роботи «Комплексне дослідження енергетичних та експлуатаційних режимів стану МС-250/150-6 ВАТ «Криворіжсталь» та розробка технічних рішень для зниження рівня реактивної потужності та втрат електроенергії» (договір №2288 (№ 19-565-05) от 21.04.05, номер державної реєстрації 0105U003727);

- держбюджетної НДР «Дослідження та розробка засобів створення високоефективних технологій гірничо-металургійних комплексів на основі енергоресурсозбереження» (договір № 30-76-07, номер державної реєстрації 0107U002965);

- держзамовлення «Дослідження та розроблення ресурсоенергозберігаючих систем та засобів живлення і керування енергоємними установками гірничо-металургійного комплексу» (Наказ Міністерства освіти і науки України від “24” липня 2007 року № 644, договір ДЗ/399-2007 від 24.07.2007, номер державної реєстрації 0107U007250).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є поліпшення енергетичних показників в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом за рахунок активного контролю і впливу на їх формування з використанням компенсаційних властивостей безпосередньо перетворювачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити вплив неактивних складових повної потужності на додаткові втрати активної потужності в мережах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом в умовах несинусоїдності і нестабільності енергопроцесів;

- розробити методи аналізу, розрахунків та прогнозування енергетичних характеристик в системах живлення поодиноких і групових енергоємних установок з регульованим електроприводом та нестабільними навантаженнями на основі структурно-аналітичного моделювання енергопроцесів та елементів спектральної теорії функцій струму і напруги;

- створити математичну модель і дослідити електромагнітні процеси взаємовпливу та комутаційних спотворень напруги за умови сумісного живлення

групи перетворювальних пристроїв з врахуванням навантажень окремих установок;

– визначити компенсаційні властивості та резерви m -фазних перетворювальних пристроїв, які в умовах групового живлення і керування установками забезпечують мінімальні рівні неактивних складових потужності і гармонік без зовнішніх компенсаційних пристроїв;

– створити структури і алгоритми функціонування автоматизованих систем, які в умовах діючого обладнання забезпечують контроль енергетичних показників на технологічному рівні, використовуючи за вихідні параметри струм і напругу (швидкість) стандартних (штатних) інформаційно-керуючих пристроїв установок.

Об'єкт дослідження – енергообмінні процеси та режими в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом.

Предмет дослідження – розрахункові співвідношення та показники визначення складових повної потужності, що використовуються для оцінки характеристик електроспоживання та вибору засобів їх підвищення в системах живлення установок з регульованим електроприводом.

Методи досліджень. Під час вирішення поставлених у дисертаційній роботі наукових задач використовувалися методи багатокритеріальної оцінки якісних і кількісних характеристик енергоспоживання при формуванні електромагнітних процесів і електромагнітних режимів в розгалужених мережах живлення і електропостачання з нелінійними колами; методи дискретного гармонічного аналізу і синтезу в розрахунках енергетичних показників; методи математичного моделювання процесів взаємовпливу.

Основні наукові положення, їх новизна

Наукові положення.

1. Розрахунок енергетичних показників систем живлення виробничих установок з регульованим електроприводом (складових повної потужності, енергетичних коефіцієнтів, втрат), як вихідної передумови щодо оцінки якісних характеристик електроспоживання та вибору способів їх поліпшення, здійснюється на підставі використання кінцевих інтегральних і спектральних співвідношень, отриманих, на відміну від відомих підходів, виключенням складних графоаналітичних операцій, що в умовах несинусоїдності і нестабільності енергопроцесів значно спрощує розрахунки та є підставою щодо створення автоматизованих систем оцінки і контролю енергетичних показників.

2. Поліпшення енергетичних показників за рахунок зниження рівня неактивних складових повної потужності і втрат електроенергії в ланках складних мереж здійснюється за наявності повної інформації енергообмінних процесів у їх вузлових точках, яка встановлюється згідно запропонованих алгоритмів розрахунків, та вибору способів компенсації на основі безпосередньо споживачів-регуляторів з комбінованою комутацією перетворювачів, що, у порівнянні з відомими способами, на порядок знижує масо-габаритні показники зовнішніх компенсаційних пристроїв при компенсації залишкового рівня неактивних складових потужностей.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Доведена доцільність використання елементів спектральної теорії функцій (струму і напруги) в розрахункових рівняннях складових повної потужності, струмів і гармонік, як одного із основних етапів моделювання і розрахунку енергетичних показників в замкнутому вигляді, що, на відміну від відомих методів (інтегрального та спектрального), виключає складні графоаналітичні операції при визначенні енергетичних показників в умовах нестабільності та несинусоїдності енергопроцесів.

2. Визначені напрями і схемотехнічні рішення щодо поліпшення енергетичних показників в системах живлення установок зі змінними (турбомеханізми) та ударно-циклічними (прокатні стани) навантаженнями, які передбачають часткову (до 25%) модернізацію обладнання споживачів-регуляторів без використання, як це традиційно прийнято, зовнішніх компенсаційних пристроїв.

3. Створена і використана математична модель для дослідження комутаційних процесів взаємовпливу, яка, на відміну від відомих, враховує сумісність електромагнітних режимів будь-якої кількості споживачів від загальної мережі і яка дозволяє встановити кількісні і якісні характеристики взаємовпливу в залежності від режимів роботи групи установок.

4. Доведений вплив неусталених режимів установок з перетворювальними пристроями (за рахунок нестабільності їх кутів керування і струмів) на якісні показники електроспоживання – зміну частоти струму (до 23%) і появу несиметрії струму (до 150 %), що потребує коригування параметрів фільтро-компенсаційних пристроїв в залежності від навантажувальних характеристик установок.

5. Обґрунтований підхід щодо створення і практичної реалізації нетрадиційних систем автоматизованого контролю показників електроспоживання виробничими установками з регульованим електроприводом, який, на відміну від традиційного (на основі підключених до мереж лічильників), надає безперервну і повну інформацію про енергетичні показники, використовуючи для цього обмежену кількість вихідних параметрів (струму і напруги) та пристроїв інформаційно-керуючої частини установок.

Обґрунтованість і вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій, запропонованих у роботі, підтверджується положеннями теорії балансу енергій в електричних колах, даними математичного моделювання, збігом результатів теоретичних розробок і комп'ютерного моделювання з натурними даними.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

– використанні розроблених у дисертації наукових положень і результатів для створення енергоефективних систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом;

– розробці методів розрахунку енергетичного балансу для систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом, які забезпечують реалізацію алгоритмів розрахунків складових повної потужності і гармонік в замкнутому вигляді;

– розробці методів компенсації неактивних складових потужності в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом за рахунок використання компенсаційних властивостей безпосередньо перетворювачів в умовах їх електромагнітного взаємовпливу.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював задачі дослідження, наукові положення і результати, виконав теоретичну та практичну частину роботи і розробив алгоритми розрахунку енергетичних показників в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом.

Апробація результатів. Основні положення, наукові й практичні результати роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічній конференції «Проблеми розвитку криворізького залізорудного басейну», м. Кривий Ріг, 2002 р; міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», м. Алушта, Крим, 2003, 2005, 2007, 2008 рр.; міжнародних науково-технічних конференціях «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» м. Кривий Ріг, 2005–2008 рр.; міжнародній науково-технічній конференції з проблем електромеханіки та енергозбереження «Перспективні методи та технічні засоби підвищення енергоємних установок та технологічних комплексів гірничо-металургійної промисловості», м. Кривий Ріг, 2004 р.; міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка й енергоефективність», м. Алушта, Крим, 2006 р.; IV всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів, м. Кременчук, 2006 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені у 25 друкованих працях, з них 21 – у наукових виданнях, затверджених ВАК України як фахові, 4 – матеріали конференції. Дві наукові праці написані без співавторів.

Структура й об'єм дисертації. Повний обсяг дисертації складає 208 сторінок друкованого тексту і містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел зі 124 найменувань на 13 сторінках та 7 додатків на 46 сторінках. Основна частина викладена на 137 сторінках. Дисертація містить 65 рисунків та 9 таблиць, з них 13 рисунків та 2 таблиці повністю займають 12 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність досліджень і сформульовані наукова проблема, мета і задачі досліджень щодо поліпшення енергетичних показників в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом, наведені наукові положення, які виносяться на захист, показані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів та їх апробація.

У першому розділі висвітлені загальні підходи щодо поліпшення енергетичної ефективності в системах живлення енергоємних установок (СЖЕУ) з регульованим електроприводом з урахуванням характеру технологічного навантаження самих установок. Показано про неподільність процесів розвитку методів поліпшення енергетичної ефективності СЖЕУ та контролю їх

енергетичних показників. На підставі всебічного аналізу відомих методів розрахунку і прогнозування енергетичного стану СЖЕУ, які переважно спрямовані для синусоїдних енергопроцесів, запропонований новий підхід щодо розрахунку енергетичних показників в СЖЕУ в умовах несинусоїдності та нестабільності навантаження. З цією метою проведена узагальнена класифікація СЖЕУ з регульованим електроприводом, на базі якої розроблені структури енергетичних моделей для типових СЖЕУ. Для кожної такої моделі отримані розрахункові співвідношення гармонік струму та складових потужності.

Розділ завершується постановкою задач досліджень.

Другий розділ присвячений формуванню енергетичних режимів в системах живлення енергоємних установок-турбомеханізмів.

З огляду на технологічні особливості роботи турбомеханізмів, перевага віддається системам змінного струму на основі вентильного двигуна чи частотного приводу. Структури силової частини таких систем містять дві ланки перетворення енергії: випрямляч та інвертор. При істотному економічному ефекті, що одержаний за рахунок регулювання продуктивності турбомеханізмів (насосів, компресорів, вентиляторів) за допомогою приводу, системи живлення (СЖ) і керування, проте мають низку недоліків у частині показників якості перетворення і споживання електроенергії. Це пояснюється тим, що стосовно мережі живлення дволанкові перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму представлені звичайними одно- і двомостовими схемами випрямлення. Потужність першої гармоніки на вході для одиночної установки:

$$P_{(1)} = P_{dn} \left(1 + \frac{\rho_{1min}}{K_{1II}^2} \right) = \frac{P_M}{\eta_2 \cdot \eta_H} \left(1 + \frac{\rho_{1min}}{K_{1II}^2} \right), \quad (1)$$

де ρ_{1min} – відносні втрати в первинній ланці при оптимальному електроспоживанні, тобто за відсутності неактивних складових потужності; K_{1II} – коефіцієнт потужності первинної ланки; η_2, η_H – відповідно ККД вторинної ланки і вузла навантаження (двигуна і механізму); P_M – технологічна потужність установки; P_{dn} – номінальна потужність регульованого електроприводу.

Отримані на цій підставі розрахункові співвідношення враховують залежність реактивної потужності \bar{Q} первинної ланки від відносної швидкості $\bar{\omega}$ (продуктивності) турбомеханізму та способу керування перетворювача і мають вигляд:

– симетричний спосіб керування

$$\bar{Q}_{(1)c} = K_H \cdot \bar{\omega}^{-2} \cdot \frac{\sqrt{1 - (\bar{\omega} \cdot \cos \alpha_{min})^2}}{\cos \alpha_{min}}; \quad (2)$$

– несиметричний спосіб керування

$$\bar{Q}_{(1)} = K_H \cdot \bar{\omega}^{-2} \cdot \frac{\sqrt{\bar{\omega}(1 + \cos \alpha_{min})(2 - \bar{\omega} \cdot (1 + \cos \alpha_{min}))}}{1 + \cos \alpha_{min}}; \quad (3)$$

де $\bar{\omega}$ – відносна швидкість турбомеханізму; α_{min} – мінімальний кут керування вентилями первинної ланки (з урахуванням усіх факторів коливається від 15° до 30° ; $K_H = (1 + \rho_{1min} / K_{1II}^2) (\eta_2 \cdot \eta_H)^{-1}$.

Відповідні графічні залежності наведені на Рис. 1, які засвідчують суттєве (30–45%) зниження реактивної потужності в робочому діапазоні зміни швидкості (0,8–1,0) $\bar{\omega}_n$ при використанні несиметричного способу керування. Але високий рівень парних (4-ї та 2-ї) гармонік струму обмежує широке застосування вказаного варіанту в реально діючих установках. На підставі отриманих результатів та їх критичної оцінки автором запропоновані схемотехнічні рішення



Рис. 1. Залежності відносної реактивної потужності турбомеханізму від відносної швидкості при симетричному (а)

і здійснені багатоваріантні розрахунки енергетичної ефективності і шляхів її підвищення за рахунок використання систем живлення і керування з властивостями парно-групової компенсації та комбінованої комутації (Рис. 2). Вказане рішення забезпечує, окрім повної компенсації реактивної потужності (або ж її генерації) (Рис. 3), формування еквівалентного багатофазового режиму з мінімальними рівнями 5-ї та 7-ї гармонік струму. Разом з цим, в умовах реально-діючого виробництва (на прикладі кисневого цеху ВАТ «АрселорМіттал-Кривий Ріг») показано, що компенсаційних властивостей синхронних двигунів цілком достатньо для забезпечення оптимального режиму за реактивною потужністю, що здешевлює формування оптимального рівня реактивної потужності на 12 – 15% за рахунок збереження спрощеної системи симетричного керування, а компенсація 5-ї і 7-ї гармонік струму в межах поодинокієї установки здійснюється за рахунок використання діючих еквівалентних 12-ти фазних схем.

Рис. 2. СЖЕУ на основі двомостових схем з комбінованою комутацією

Третій розділ присвячений поліпшенню енергетичних показників СЖЕУ з циклічно-нестабільними навантаженнями.

Енергоємні установки (комплекси) з циклічно-нестабільними навантаженнями мають специфічні умови формування електромагнітних і енергетичних процесів. Використання енергетичних структур та виразів для складових потужності в будь-якій точці системи створює передумови до рішення низки практичних задач, зокрема, під час оцінювання і прогнозування показників електроспоживання систем живлення і керування групою реально діючих технологічних об'єктів (механізмів).

Наявність однотипних розрахункових операцій, в першу чергу, з визначення складових повної потужності і діючих значень гармонік (струмів) у всіх ланках схем дозволяє в ході вирішення вказаних задач використовувати єдиний принцип синтезу алгоритмів і програм. Тут основна відмінність полягає лише у способах отримання і введення початкової інформації, яка характеризує, наприклад, для електроприводу навантаження і швидкісні режими об'єктів.

Аналіз і розрахунок параметрів і показників СЖЕУ здійснюється у декілька етапів і передбачає виконання таких операцій: ідентифікацію проектованої або існуючої СЖЕУ (або окремих її структур) енергетичними моделями відповідних типів, вибір базових розрахункових виразів, виходячи з топологій СЖЕУ і формування режимів електроспоживання в напрямі «навантаження – перетворювач – мережа»; підготовку масиву початкових даних змінної частини розрахункових виразів (з усереднених діаграм навантажень або середньостатистичних показань вимірювальних приладів) для дискретних інтервалів і за цикл; підготовку алгоритмів і програм автоматизованого розрахунку з врахуванням прийнятих способів апроксимацій функцій струмів і напруг, які входять в розрахункові вирази для відповідного режиму навантаження об'єкту.

Точність розрахунків $I_{1\Sigma}$ групової системи, яка містить n об'єктів з перетворювальними пристроями (ПП), встановлюється вибором необхідного числа p перших (більш низьких) гармонік струму, тобто $k \in \{1, \dots, p\}$, і виглядом підінтегральних функцій $i_{1i}(\omega t)$ залежно від схеми, характеру навантаження, способу керування і комутації n -го ПП (вентильної групи). Межі похибок складають 0,12 – 1,0 % для прямокутно-східчастої форми струму $i_{1i}(\omega t)$ при $k \in \{1, \dots, 61\}$.

Можливість постійного моніторингу енергетичного стану (Рис. 4) надає змогу щодо впровадження заходів мінімізації рівнів неактивних складових потужності та вищих гармонік струму. Так, чергування одно- і різнойменних схем з'єднання обмоток трансформаторів призводить до істотної компенсації 5-ї та 7-ї гармонік за рівних початкових умов, що можливо реалізувати в умовах діючого стану без додаткових капіталовкладень. При зниженні ЕРС холостого ходу вторинних обмоток трансформатора електроприводів неперервного прокатного



Рис. 3. Графіки залежностей відносної реактивної потужності для випрямлячів з природною та штучною комутацією:

- 1 – випрямлячі з природною комутацією;
- 2 – випрямлячі з комбінованою комутацією;
- 3 – $\alpha_{1П1} = \alpha_{1П2} = 15^\circ$, $\alpha_{1Ш1} = \alpha_{1Ш2} = 15^\circ$,
 $\alpha_{2П1} = \alpha_{2П2} = 15^\circ$, $\alpha_{2Ш1} = \alpha_{2Ш2} = \text{var}$;
- 4 – $\alpha_{1П1} = \alpha_{1П2} = 47^\circ$, $\alpha_{1Ш1} = \alpha_{1Ш2} = 30^\circ$,
 $\alpha_{2П1} = \alpha_{2П2} = 20^\circ$, $\alpha_{2Ш1} = \alpha_{2Ш2} = \text{var}$.

Рис. 4. Система живлення електроприводами неперервного прокатного стану НЗС-900/700/500 ВАТ «АрселорМіттал-Кривий Ріг»

стану НЗС-900/700/500 на 12% досягається зниження втрат електроенергії на 18,7% (Рис. 5). Використання парно-групового принципу компенсації неактивних складових потужності в системах живлення прокатними клітьми дозволяє при частковій модернізації силової частини (до 25% її встановленої потужності) суттєво поліпшити енергетичні показники групового електроприводу прокатного стану: зменшується середній рівень реактивної потужності в 1,6 – 2,0 раза, 5-ї гармоніки в 3,5 раза, 7-ї гармоніки – у 3,3 раза.

Четвертий розділ присвячений електромагнітній сумісності та режимам взаємовпливу в СЖЕУ.

На основі критичного аналізу відомих методів розрахунку і оцінки режимів взаємовпливу і електромагнітної сумісності та складності їх практичного використання в СЖЕУ з регульованим електроприводом обґрунтований новий підхід математичного моделювання вказаних режимів. Система диференціальних рівнянь, яка описує процеси у системі живлення групи регульованих електроприводів в комутаційні моменти, має вигляд:



Рис. 5. Втрати потужності в системі живлення неперервного прокатного стану НЗС-900/700/500 ВАТ «АрселорМіттал-Кривий Ріг»

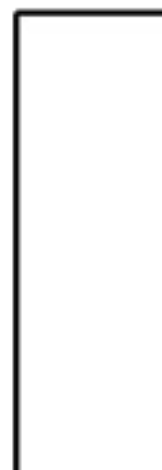


Рис. 7. Алгоритм розрахунку комутаційних процесів СЖЕУ з регульованим електроприводом

У п'ятому розділі багатоваріантними експериментальними дослідженнями встановлені принципові положення щодо формування первинного струму $i_{1\Sigma}$ СЖЕУ за умови впливу виду навантажень n -х ПП і способів керування ними на зміну форми $i_{1\Sigma}$ у повному діапазоні керування, що підтверджує складність аналітичного подання функцій $i_{1\Sigma}(\omega t)$ при визначенні діючих значень $I_{1\Sigma}$ і $I_{(k)\Sigma}$ (за виразами) і доцільність використання запропонованих співвідношень на основі часткових коефіцієнтів Фур'є.

Показано, що розрахунки на основі аналітичних наближень і апроксимацій функцій струму забезпечують визначення діючих значень гармонічних складових змінного струму з похибкою в межах 3,5% (Рис. 8). Останнє надало змогу обґрунтувати розроблення структур і алгоритмів автоматизованого контролю енергетичних показників СЖЕУ з реалізацією розрахункових операцій визначення показників у відповідності до їх математичного подання (за умови використання обмеженої кількості вихідних параметрів (напруги $U_{d\alpha i}$ та струму I_{di}) у ланці навантаження n -го перетворювача (Рис. 9), що, на відміну від відомих традиційних методів (на основі лічильних пристроїв), забезпечує автоматизований контроль за всіма показниками електроспоживання в СЖЕУ підвищеної складності при максимальному використанні пристроїв інформаційно-керуючої частини установок (комплексів).



Рис. 8. Залежності похибок розрахунку діючого значення струму за різними методами.

Наближення форми первинного струму до:
 ----- трапеції;
 — . — — прямокутника

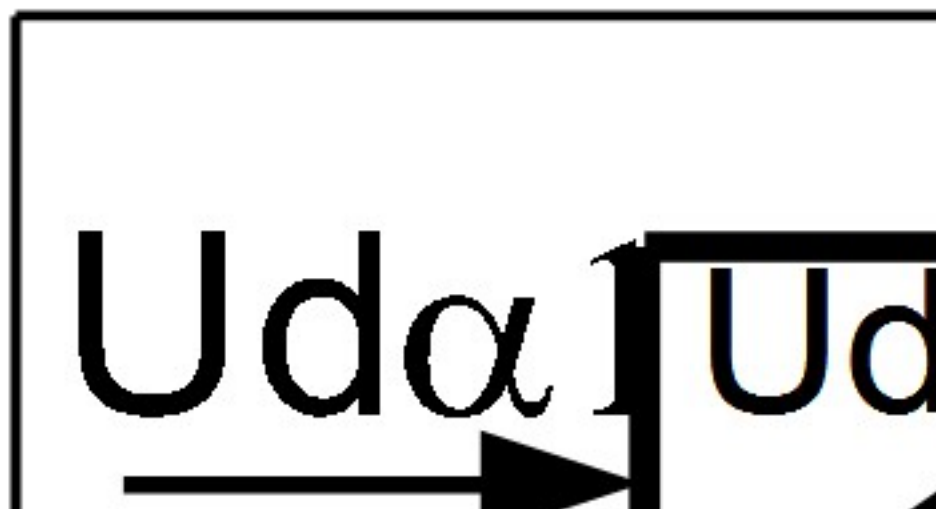


Рис. 9. Структура розрахунку енергетичних показників в умовах СЖЕУ

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача з поліпшення енергоефективності систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом за рахунок вдосконалення прийомів аналізу і розрахунків енергетичних показників зі змінними і ударно-циклічними навантаженнями на основі структурно-аналітичного моделювання енергопроцесів в умовах їх несинусоїдності та нестабільності.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження і розробки дозволяють зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. На підставі всебічного аналізу сучасного стану електроспоживання енергоємними установками (комплексами) за якісними і кількісними показниками, особливостей формування енергопроцесів в СЖЕУ підвищеної складності (враховуючи також і складність розрахунків їх відомими методами) сформульований системний, комплексний підхід щодо оцінки та підвищення енергетичних показників СЖЕУ, який ґрунтується на структурно-аналітичному моделюванні електромагнітних і енергетичних процесів з використанням елементів дискретного гармонічного синтезу і виключенні громіздких графоаналітичних операцій під час визначення базових розрахункових рівнянь та впровадженні ефективних засобів компенсації неактивних складових потужності безпосередньо перетворювальними пристроями індивідуальних установок при формуванні енергопроцесів в силових ланках «навантаження – перетворювач – мережа».

2. Запропонована методика розрахунків енергетичних показників енергоємних установок – турбомеханізмів з пуско-регулюючими пристроями на основі дволанкових перетворювачів енергії та встановлені граничні показники ефективності мостових схем первинної ланки зі спрощеним (одномостова схема) і ускладненим (двомостова схема) алгоритмами керування ПП з природною комутацією. В робочому діапазоні зміни швидкості $(0,8 \dots 1,0) \omega_n$ досягається суттєве зниження реактивної потужності (в 1,6–1,8 раза для одномостової і 1,5–2,0 раза для двомостової схем), але доцільність використання одномостової схеми обмежена наявністю парних гармонік (до 20–30% відповідно для 4-ї та 2-ї), а також непарних (до 11–12% відповідно для 7-ї та 5-ї). Для двомостових схем досягається часткова (на 45–75%), або повна компенсація парних і непарних (особливо 2-ї, 4-ї, 5-ї та 7-ї) гармонік струму та покращується спектральний склад напруги (струму) проміжної ланки.

3. Дослідженнями встановлено, що компенсаційні властивості схем з комбінованою комутацією, які ґрунтуються на поєднанні природної комутації з примусовою, суттєво розширюються в СЖЕУ, коли, окрім повної компенсації реактивної потужності (або ж її генерації), формується еквівалентний багатозонний режим з мінімальними рівнями 5-ї та 7-ї гармонік струму. Враховуючи особливості навантаження турбомеханізмів та обмежений діапазон регулювання швидкості $\bar{\omega}$, найбільш ефективним є варіант двомостової схеми з триобмотковими трансформаторами і в залежності від необхідного рівня компенсації ре-

активної потужності можливе використання лише 25 або 50% повністю керуваних ключів.

4. Обґрунтований і розроблений концептуальний підхід щодо аналізу, розрахунків та прогнозування енергетичних показників СЖЕУ з циклічними і нестабільними навантаженнями, який, на відміну від відомих загальних положень ймовірнісної теорії випадкових процесів і графоаналітичних операцій, передбачає використання детермінованих функцій опису складових потужності гармонік і струмів із залученням елементів дискретного гармонічного синтезу і дозволяє на порядок знизити об'єми розрахункових операцій. Практичне використання розробленого методу й уніфікованих алгоритмів дозволили встановити основні закономірності формування енергопроцесів в СЖЕУ неперервного прокатного стану і визначити вихідні передумови щодо впровадження ефективних засобів компенсації неактивних складових потужності.

5. Запропоновані схемо-технічні рішення з властивостями парно-групової компенсації реактивної потужності та потужності спотворення, що дозволяє при частковій модернізації силової частини (до 25% її встановленої потужності) суттєво поліпшити енергетичні показники групового електроприводу прокатного стану. В цих випадках спрощений і дешевий варіант компенсації дозволяє знизити середній рівень реактивної потужності в 1,6–2,0 раза, 5-ї гармоніки в 3,5 раза, 7-ї гармоніки – в 3,3 раза, а більш складний забезпечує режим повної компенсації Q_{Σ} (або її часткової генерації) та зниження рівнів компенсуючих гармонік порядку $m/2(2l-1) \pm 1$ в 5–10 разів.

6. При обґрунтуванні, розробці і впровадженні схемотехнічних рішень щодо підвищення енергетичної ефективності енергоємних технологічних комплексів в умовах групового живлення, першочергово необхідно враховувати специфічні особливості формування балансу складових повної потужності за напрямом «навантаження – перетворювач – мережа» та компенсаційні властивості, як індивідуальних перетворювачів так і за умови їх електромагнітного та енергетичного взаємозв'язку в груповій системі. Впровадження вказаних заходів, наприкладі неперервного прокатного стану НЗС-900/700/500 ВАТ «АрселорМіттал-Кривий Ріг», надасть змогу зменшити втрати в мережах підстанції КРЗ-5 не менше ніж 100 МВт·год на рік (52 тис. грн. на рік з терміном окупності 1,8 року).

7. Дослідженнями неусталеного режиму навантаження, який характеризується циклічністю і нестабільністю з часовою зміною кута керування та струму, установлені причини порушення умови врівноваження намагнічуючих сил трансформаторів, появу несиметрії струму та гармонік всіх порядків, вплив вказаного режиму на роботу фільтро-компенсаційних пристроїв. Для установок (механізмів) підвищеної швидкодії (наприклад, ножиць), при зміні кута керування $\Delta\alpha$ в межах $5-8^\circ$ і відносній зміні струму $\Delta i = 0,20-0,25$ необхідно враховувати наявність всіх гармонік (включно з парними та кратними трьома) та виникнення несиметрії струму (для розрахункового інтервалу в межах $0,2-0,5$), а для установок меншої швидкодії (наприклад, прокатного стану) доцільно враховувати лише зміну активної та реактивної потужностей.

8. Експериментальними дослідженнями підтверджені теоретичні положення щодо особливостей формування первинного струму $i_{1\Sigma}$ СЖЕУ, складності математичного подання його відомими методами та доцільності використання запропонованих в дисертації співвідношень на основі часткових коефіцієнтів Фур'є при визначенні діючих значень струму $I_{1\Sigma}$ і гармонік $I_{(k)\Sigma}$, коли в умовах діючого обладнання похибки їх аналітичних розрахунків не перевищують 0,5–1,0% при обмеженому об'ємі розрахункових операцій і мінімальній складності алгоритмів за рахунок використання спрощених аналітичних співвідношень струмів індивідуальних ПП.

9. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень здійснені розробка і впровадження в навчальний процес і наукові дослідження діагностично-вимірний комплекс (на основі запропонованої концепції побудови нетрадиційних структур автоматизованого контролю енергетичних показників), що створило передумови для розробки і впровадження в прокатне виробництво уніфікованої блочно-модульної системи автоматизованого контролю показників електроспоживання з максимальним використанням інформаційно-керуючих пристроїв "SIMADYN D" фірми SIEMENS в умовах діючого стану ПС-150-1 СПЦ-1 ВАТ «АрселорМіттал-Кривий Ріг» та вихідних змінних параметрів I_{di} , U_{di} ланки постійного струму ПП, а вартісні показники такої системи на порядок нижчі існуючих за умови їх наявності.

Основні положення і результати дисертації опубліковано в таких роботах:

1. Кольсун В.А. Гармоніки струму та напруги в системі групового живлення та керування турбомеханізмами / В.А. Кольсун // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2005. – Вип. 7. – С. 128–131.

2. Кольсун В.А. Энергетические характеристики системы питания и управления механизмами непрерывного прокатного стана / А.Ф.Синолицый, В.Е.Момот, В.А.Кольсун // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» : зб. наук. праць. – 2005. – № 45. – С. 421–422.

3. Кольсун В.А. Коммутационные процессы в системах питания и управления группой турбомеханизмов / А.Ф.Синолицый, В.А.Кольсун // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» : зб. наук. праць. – 2005. – № 45. – С. 332–333.

4. Кольсун В.А. Электромагнитная совместимость в системах питания и управления группой турбомеханизмов / А.Ф.Синолицый, В.А.Кольсун // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : зб. наук. праць. – 2005. – № 3 (32). – С. 46–50.

5. Кольсун В.А. Повышение энергетической эффективности систем группового питания и управления турбомеханизмами / А.Ф.Синолицый, Ю.Г.Осадчук, В.А.Кольсун // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: зб. наук. праць. – 2003. – № 2 (19). – Т. 1. – С. 120–125.

6. Кольсун В.А. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость группового электропривода турбомеханизмов / А.Ф.Синолицый, Ю.Г.Осадчук, В.А.Кольсун // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» : зб. наук. праць. – 2003. – № 10. – Т. 2. – С. 480–483.

7. Кольсун В.А. Реактивна потужність у колах з несинусоїдними напругою та струмами / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 21. – С. 128–133.

8. Кольсун В.А. Аналітичні наближення в розрахунках енергетичних показників / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки) : Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2007. – С. 562–563.

9. Кольсун В.А. Енергетичні характеристики тиристорних електроприводів постійного струму у динамічному режимі їх роботи / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 2. – С. 33–38.

10. Кольсун В.А. Нетрадиційні системи автоматизованого контролю та обліку енергетичних показників / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 17. – С. 138–142.

11. Кольсун В.А. Методологія оцінки параметрів згладжуючого дроселя дволанкових перетворювачів / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков, П.Ю.Єдаков // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 20. – С. 117–121.

12. Кольсун В.А. Компенсація реактивної потужності і гармонік у системах живлення і керування установками металургійного виробництва / А.П.Сінолицый, Ю.Г.Осадчук, В.А.Кольсун // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 16. – С. 101–105.

13. Кольсун В.А. Електромагнітні процеси перетворювачів в несталіх режимах роботи / А.П.Сінолицый, О.О.Удовенко, В.А.Кольсун // Технічна електродинаміка. – Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 2. – С. 47–50.

14. Кольсун В.А. Режими взаємовпливу в системах групового живлення і керування механізмами з циклічно-нестабільними навантаженнями / А.П.Сінолицый, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков, Д.О.Кальмус, О.О.Удовенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» : зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 30. – С. 443–444.

15. Кольсун В.А. Автоматизований контроль та облік енергетичних показників групових систем електроприводу / А.П.Сінолицый, В.Ю.Момот, В.А.Кольсун, М.В.Жуйков, Д.О.Кальмус // Вісник Національного технічного університету «Ха-

рківський політехнічний інститут» : «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» : зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 30. – С. 503–504.

16. Кольсун В.А. Комутаційні режими в системах групового живлення і керування енергоємними установками / А.П.Сінолиций, В.А.Кольсун, Д.О.Кальмус, М.В.Жуйков // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – № 2.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих у співавторстві:

- математичні моделі дослідження енергообмінних процесів у первинному колі систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом [5];
- математична модель дослідження комутаційних процесів в системі живлення групи тиристорних електроприводів [3, 4, 6, 14, 16];
- математичні рівняння електромагнітних процесів перетворювачів у несталих режимах [9, 13];
- удосконалений математичний апарат для аналізу формування балансу складових потужності в мережах з нелінійними навантаженнями [7];
- створення алгоритму автоматизованого розрахунку показників електроспоживання в системах живлення енергоємних установок з перетворювачами [2, 12, 15];
- залежності похибок у розрахунках енергетичних показників в системах живлення з регульованим електроприводом від величини навантаження та різних аналітичних наближень струму [8, 10];
- вирази підсумкової напруги в колі постійного струму дволанкового перетворювача [11].

АНОТАЦІЯ

Кольсун В.А. Способи поліпшення енергетичних показників систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2010.

Дисертація присвячена поліпшенню показників якості електроенергії в системах живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом.

В роботі розроблені теоретичні основи аналізу, розрахунку та прогнозування показників енергоспоживання в умовах нестабільності навантажень та створення на цій основі високоефективних систем живлення енергоємних установок з регульованим електроприводом. Отримані залежності зміни енергетичних показників з урахуванням характеру навантаження установок.

На основі критичного аналізу відомих методів розрахунку і оцінки режимів взаємовпливу та складності їх практичного використання в системах живлення енергоємних установок з перетворювальними пристроями, обґрунтовано новий підхід математичного моделювання вказаних режимів і створено уніфікований алгоритм автоматизованих багатоваріантних розрахунків. Алгоритм передбачає визначення гармонік струму і напруги в загальній мережі живлення групи при-

ймачів з регульованим електроприводом, а також провалу фазної (лінійної) напруги для всіх варіантів комутації.

Проведені експериментальні дослідження та здійснена практична реалізація систем і пристроїв розрахунку енергетики розглянутих систем живлення.

Ключові слова: система живлення, регульований електропривод, енергетичні показники, електромагнітна сумісність, баланс потужностей, компенсація неактивних складових потужності.

АННОТАЦІЯ

Кольсун В.А. Способы улучшения энергетических показателей систем питания энергоемких установок с регулируемым электроприводом. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Национальный горный университет, Днепропетровск, 2010.

Диссертационная работа посвящена улучшению энергетических показателей в системах питания энергоемких установок с регулируемым электроприводом за счет активного контроля и влияния на их формирование с использованием компенсационных свойств непосредственно преобразователей.

В работе разработаны теоретические основы анализа, расчета и прогнозирования показателей энергопотребления в условиях нестабильности нагрузок и создания высокоэффективных систем питания энергоемкими установками и комплексами с регулируемым электроприводом. Получены зависимости изменения энергетических показателей с учетом характера нагрузок установок (основное внимание уделено таким установкам, как турбомеханизмы – на примерах турбокомпрессоров, и механизмам циклического действия – на примерах прокатного стана, главного электропривода блюминга).

В работе предложены энергетические модели, показывающие энергетическую связь между объектами электропотребления и объектами электроснабжения в системах питания энергоемкими установками с регулируемым электроприводом, которые адекватно отображают формирование энергобаланса в сложных системах в направлении «нагрузка-преобразователь-сеть». Анализ, расчеты и прогнозирование показателей энергоэффективности осуществляются структурно-аналитическим моделированием, включающее использование энергетических моделей и элементов дискретного гармонического синтеза. Повышение энергетической эффективности систем питания энергоемких установок с регулируемым электроприводом осуществляется комплексным подходом с приоритетом компенсации неактивных составляющих на технологических уровнях с использованием компенсирующих способностей непосредственно преобразовательными устройствами в цепях питания и управления, а компенсацию остаточного уровня внешними компенсаторами.

Проведены исследования неустановившихся режимов преобразователей регулируемых электроприводов энергоемких установок. Показано, что определение энергетических характеристик установок с преобразовательными установками и нестабильными нагрузками связано со специфическими условиями формирования составляющих мощности и гармоник тока на интервалах изме-

нений нагрузки. Доказано, что указанные составляющие мощности пропорционально зависят от скорости изменения нагрузки (тока) и угла управления.

На основании критического анализа известных методов расчета и оценки режимов взаимовлияния и электромагнитной совместимости и сложности их практического использования в системах питания с преобразовательными установками, обосновано новый подход математического моделирования указанных режимов, основанный на решении дифференциальных уравнений за специальной схемой вычисления производных и созданный унифицированный алгоритм автоматизированных многовариантных расчетов. Алгоритм вычисляет гармоники тока и напряжения в общей сети питания группы приемников с преобразовательными устройствами, а также провала фазного (линейного) напряжения для всех вариантов коммутации (учитывая также совпадение коммутаций N -го количества преобразователей).

Проведены экспериментальные исследования и выполнена практическая реализация систем и устройств расчета энергетики рассмотренных систем.

Ключевые слова: система питания, регулируемый электропривод, энергетические показатели, электромагнитная совместимость, баланс мощностей, компенсация неактивных составляющих мощности.

THE SUMMARY

Kolsun V.A. The energy datum improvement ways of supply systems of power-consuming plants with controlled-velocity electric drive. – Manuscript

The thesis for a candidate's degree by specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Mining University, Dnipropetrovsk, 2010.

The thesis is devoted to improving power indices in power-consuming industries by means of model problem solution and power processes calculation of different electric drive systems.

Theoretical fundamentals of power indices analysis, calculation and prediction under instability conditions are developed. High-performance group electrical drive systems are founded by means these fundamentals. Main power dependences were taken into account plants loading.

New mathematical modeling approaches are grounded on the base of known calculation methods analysis and estimation of inter-influence conditions and electromagnetic compatibility and differential equations calculation by mean special elaborated method of solving derivative. It is developed the uniform algorithm of automatic poly-variant solving. The algorithm makes provision for determining current and voltage harmonics of net which supply converters group. Phase and linear voltage drops for different events may be calculated by mean the algorithm.

Experimental researches are lead. Practical achievement of this systems and registration devices of such systems are made.

Key words: the supply systems, controlled-velocity electric drive, power indices, the electromagnetic compatibility, the energy balance, the compensation of non-active power components.

Кольсун В'ячеслав Анатолійович

**Способи поліпшення енергетичних показників систем живлення
енергоємних установок з регульованим електроприводом**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Підписано до друку 26.02.2010.
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. – 0,9. Авт. арк. – 0,9.
Тираж – 100 пр. Замовлення № 113-02.

Друкарня СПД Щербенок С. Г.
Свідоцтво ДП № 126-р від 12.10.04
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027
тел.: (0564) 92-20-77