

УДК 521.874

В.Ю. БОНДАР, доцент, кандидат технічних наук

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ

*Запорізька державна інженерна академія*

Виконано аналіз проблеми підвищення енергоефективності, покращення експлуатаційних режимів і загальної економічності експлуатації підйомно-транспортного обладнання та, зокрема, модернізації мостових підйомних кранів металургійних підприємств України. Запропоновано інженерні вирішення зазначених проблем з мінімальними фінансовими та часовими витратами.

Ключові слова: мостові підйомні крани, електропривод, енергоефективність, силові резистори, IGBT модулі

*Вступ.* Проблема енергозбереження для підйомно-транспортного обладнання України, як відомо, є дуже нагальною проблемою. Експлуатація фізично- та морально застарілого обладнання для управління електродвигунами з використанням силових резисторів призводить до 30...40 % втрат від потужності самих електродвигунів.

*Постановка завдання.* Відомо, що існуючий стан у сфері експлуатації підйомно-транспортного обладнання на багатьох металургійних, підприємствах України визначається високими експлуатаційними витратами. Вони складаються з витрат на сплату енергоресурсів, поточне обслуговування, ремонтні роботи, а також на придбання витратних матеріалів. Левову частку підйомно-транспортного обладнання на металургійних підприємствах створюють мостові підйомні крани, робота яких є важливою складовою технологічних процесів. Значну частину зазначеного обладнання на великих металургійних підприємствах складає спеціалізоване підйомно-транспортне обладнання, зокрема, скіпові підйомники на доменних печах або завалочні машини у мартенівських цехах. Характерною ознакою електроприводної частини механізмів такого обладнання є застосування електродвигунів постійного струму послідовного збудження або змінного струму з фазним ротором і релейно-контакторною апаратурою в силових колах [1].

Головною причиною застосування такого типу електроприводів є стан розвитку електроприводної техніки на час їхнього створення (50...60 років тому), прості та дешеві силові схеми порівняно із системами «генератор-двигун» та, що є головним і актуальним і до теперішнього часу, сприятливі характеристики регулювання швидкості та крутного моменту. Необхідність достатньо плавного регулювання швидкості у

широкому діапазоні, як за режимом пуску та гальмування, так і за режимом усталеної швидкості, а також, висока переважувальна здатність таких двигунів, обумовлена вимогами технологічного процесу металургійного виробництва, наприклад, вимогами точного позиціонування важких та відповідальних вантажів (ковшів з рідким металом, завантаження багатотонних злитків до нагрівальних печей та ін.). Слід зазначити, що найбільшою складовою експлуатаційних витрат є енергетичні витрати. Як витікає з аналізу зазначених вище типових силових схем, силове коло містить резистори, через які протікає силовий струм, що призводить до значних втрат [2], які є співставними (до 30...40 %) з номінальною потужністю самого електричного двигуна.

*Аналіз проблем та шляхи їх вирішення.*

Під час розрахунків втрат енергії для такого роду електроприводів необхідно визначати вид механічної енергії, яка розсіюється у силових резисторах за роботи існуючого підйомно-транспортного обладнання. В режимі прискорення маси вантажу та маси самого обладнання, яка становить майже 50 % самого вантажу, в горизонтальній площині відбувається запасання тільки кінетичної енергії за формулою:

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (1)$$

де  $W_k$  – кінетична енергія рухомих елементів у горизонтальній площині;  $m$ ,  $J$  – маса та момент інерції рухомих елементів підйомно-транспортного обладнання, які переміщуються у горизонтальній площині, відповідно;  $v$ ,  $\omega$  – лінійна та кутова швидкість рухомих елементів підйомно-транспортного обладнання відповідно.

В той же час за умови переміщення вантажу щодо вертикальній площині (підйом та опускання) загальна енергія, яку запасують, є сумою потенціальної енергії маси вантажу та вантажозахватних засобів, а також кінетичної енергії час-

тин механізму підйому з поступальним та обертальним рухом.

$$W_3 = m_g \cdot g \cdot h + \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (2)$$

де  $W_3$  – загальна енергія за умови вертикального переміщення вантажу;  $m_g$  – маса вантажу та вантажозахватних засобів, що переміщуються у вертикальній площині;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Порівняльний аналіз значень кінетичної енергії рухомих елементів підйомно-транспортного обладнання у горизонтальній площині та потенційної енергії піднятого вантажу вказує на їх значну різницю.

Так, під час розрахунків для реального мостового крана вантажопідйомністю  $Q = 30$  т для механізмів пересування мосту та підймання вантажу ( $m = 80 \cdot 10^3$  кг;  $v = 1,0$  м/с;  $h = 10$  м;  $m_g = 30 \cdot 10^3$  кг) кінетична енергія з урахуванням тільки поступальної складової руху крана у горизонтальній площині становить  $W_k = 80$  кДж, а потенційна енергія вантажу, піднятого на висоту  $h = 10$  м (середньозважена висота підймання мостових кранів у металургійних цехах) дорівнює 2940 кДж.

Після визначення співвідношення зазначених втрат енергії одержують  $W_k/W_{ng} = 37$ , тобто головними втратами для існуючих систем управління електроприводами мостових підйомальних кранів є втрати під час операції спускання вантажів. Попередніми розрахунками встановлено, що ціна втраченої енергії для одного 30-тонного мостового крану становить близько 135 тис. грн. на рік

Окрім втрат енергії, значних експлуатаційних витрат потребує і поточне обслуговування громіздкої та коштовної релейно-контакторної апаратури, яка складається з численних механічних рухомих частин. Спрацювання цих вузлів досягає 300...600 вмикань на годину та вони мають обмежений ресурс безвідмовності. З іншого боку така частина комутації силовими контактами пускових та гальмівних струмів призводить до швидкої електричної ерозії, що також потребує їхнього придбання і частоті заміни.

Необхідно також звернути увагу і на вплив несприятливих факторів, спричинених існуючими релейно-контакторними системами електроприводів, на роботу їхньої механічної частини. До таких факторів слід віднести значні похідні моменти електродвигунів за умови стрибків струму в силових колах, спричинених комутацією контактів контакторів через різке зменшення

електромагнітної сталої часу якірного кола, що витікає із співвідношення

$$T_j = \frac{L_j}{R_j + R_n} \ll \frac{L_j}{R_j}, \quad (3)$$

де  $T_j$ ,  $L_j$ ,  $R_j$  – стала часу, індуктивність та омичний опір якірного кола відповідно;  $R_n$  – опір пускового резистора,  $R_n \gg R_j$ .

Опір пускового резистора  $R_n$ , швидкість зростання струму та, відповідно, і крутного моменту на валу електродвигуна досягає значних величин, що негативно впливає на стан редукторів, а також ходової частини механізмів пересування крана за наявності люфтів, які, як правило, є присутніми у кінематичних ланках. Надвелика швидкість зростання сили струму в силовому колі також призводить до підвищеного зносу колектора та щіток внаслідок поганої комутації струму між ламелями колектора для електродвигунів постійного струму та механічного навантаження лобових частин обмоток електродвигунів змінного струму та крутних моментів осердя якоря або ротора відносно вала електродвигуна.

Суттєвим недоліком релейно-контакторної апаратури є необхідність частого вмикання силового кола для більш точного позиціонування вантажу, що призводить до значної витрати часу та зношення силового обладнання. Тому обслуговуючий персонал крана повинен мати належну професійну підготовку та навички, які потребують значного часу для їхнього набуття, що суттєво впливає на технологічний процес.

Щодо впливу дискретності управління та пружності ланок кінематичної схеми механізму пересування моста, то слід відзначити можливість буксування ходових коліс та перекосу ферм балок моста внаслідок їх пружності та різниці лінійних швидкостей ходових коліс. За наявності буксування можуть з'являтися пошкодження як на поверхні самого колеса, так і на поверхні підкранових колій. Зважаючи на викладене і, враховуючи сучасні досягнення та можливості силової електроніки і розвиток теорії електропривода, а також достатньо складне економічне становище українських металургійних підприємств, пошук економічних та ефективних, вирішень є актуальним.

Відомо, що тенденція розвитку силової електроніки та електропривода вказує на тотальний перехід на застосування потужних IGBT транзисторних модулів і створення на їх основі автономних транзисторних інверторів напруги (АН), які використовують як регульовані перетворювачі частоти для живлення асинхронних електродвигунів з коротко замкнутим ротором, у тому

числі на підйомно-транспортних засобах [4,5]. Як правило, такі технічні вирішення використовують під час проектування нового підйомно-транспортного обладнання, а також для реконструкції існуючих виробництв, які мають потужну фінансову базу. Реконструкція підйомно-транспортного обладнання з електроприводами постійного та змінного струму з використанням вищезгаданих технічних вирішень (застосування перетворювачів частоти та асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором) потребує значних обсягів капітальних вкладень, а також виконання робіт щодо заміни існуючих електродвигунів, редукторів та конструкцій майданчиків для їх встановлення, повної заміни мережі живлення постійного струму на мережу, яка використовує трифазний змінний струм, або за збереженням існуючої мережі живлення встановлення додаткового обладнання [6,7]. Окрім того, необхідно мати на увазі малу перевантажувальну здатність асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором ( $1,5 M_{ном}$ ) проти  $2,5...3,0 M_{ном}$  для існуючих електродвигунів. З огляду на важкі умови експлуатації в існуючих цехах металургійного виробництва та повторно-короткочасний режим роботи (враховуючи, що значний проміжок часу роботу здійснюють на низьких швидкостях) необхідно застосовувати незалежне охолодження асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором, для чого необхідно змінювати конструкцію таких двигунів. До того ж, враховуючи значну крутизну імпульсів напруги, їх високу частоту та негативний вплив цих факторів на стан ізоляції двигунів і генерування значних електромагнітних перешкод, слід також застосувати спеціальні екрановані кабелі та високо-частотні фільтри для під'єднання електродвигунів, що також збільшує витрати [8]. Сюди треба також додати, як зазначалося раніше, заміну редукторів та інших механічних вузлів.

В той же час, як вказує досвід експлуатації підйомно-транспортного обладнання, існуючі електродвигуни, мають достатньо великий ресурс щодо надійності роботи та за умови виконання вчасних ремонтів та вимог правильної експлуатації можуть працювати достатньо надійно ще впродовж довгого часу [8]. Приклад схожого вирішення наводиться у роботі [9]. При цьому також не потребує заміни механічне обладнання та з'являється можливість використання існуючих кабельних та дровових мереж живлення, а також існуючих апаратів управління. Таким чином, за умови збереження існуючих електродвигунів, кабельних мереж та механічного обладнання необхідно є тільки розробка

спеціальних перетворювачів, з можливістю економічного плавного регулювання швидкості та струму електродвигунів у замкнених системах регулювання. Такі системи електроприводів також мають можливість обмеження та стабілізації моментів та сил у пружній системі, якою по суті є система електроприводу підйому, а також рекуперації потенційної енергії вантажу та кінетичної енергії рухомих елементів під час їх спускання та гальмування. При цьому необхідно відзначити наукові розробки схемотехніки силових кіл та досягнення у сфері мікропроцесорної техніки, які вказують на можливість використання асинхронних двигунів із фазним ротором і які є основним типом двигунів на існуючому підйомно-транспортному обладнанні, у режимі машини подвійного живлення [6,7]. Найбільш вагомими перевагами такого режиму роботи асинхронних двигунів із фазним ротором є високі енергетичні показники: можливість працювання з випереджаючим  $\cos\phi$ , жорсткість механічної характеристики та можливість одержувати швидкість, що є вищою за синхронну, яка визначається сталою частотою мережі живлення (50 Гц). Це особливо важливо для механізмів підйому під час спускання та піднімання порожніх вантажозахватних пристроїв.

Необхідно також зазначити, що за такого роду модернізації, окрім суттєвого енергозбереження, з'являються додаткові достатньо корисні функції:

- можливість точного позиціонування вантажу без коливання вантажу та додаткових рухів механізмів крана з використанням, наприклад, *fuzzy*-регуляторів [3], як це необхідно було робити під час використання релейно-контакторного обладнання;

- забезпечення плавного безударного розбігу та гальмування механізмів;

- демпфування коливальних процесів у пружних елементах кінематичних схем за рахунок введення необхідних зворотних зв'язків і відповідно зменшення часу на технологічні операції;

- значне підвищення надійності роботи підйомно-транспортного обладнання за рахунок виключення ударних навантажень під час вибирання люфтів і плавності зростання прискорення у перехідних режимах (так звані *S*-діаграми розгону та гальмування).

- завдяки значним досягненням у розвитку систем бездротового зв'язку та появі нового покоління датчиків фізичних величин із вбудованими мікрочіпами мікроконтролерів та бездротових передавальних пристроїв з'являється мо-

жливість безперервної діагностики обладнання на рухомих об'єктах, якими є підйомно-транспортні засоби [10], що також суттєво знижує експлуатаційні витрати на ремонтні та профілактичні роботи.

Під час застосування таких перетворювачів, як зазначалося раніше, зникає необхідність в існуючих панелях релейно-контакторної апаратури та достатньо громіздких ящиків силових резисторів, що також зменшує експлуатаційні витрати на поточне обслуговування обладнання та його ремонт. Розробка та впровадження таких вирішень до вітчизняного виробництва потребує дуже обмеженого фінансування та може виконуватися конструкторськими підрозділами вищих навчальних закладів інженерного профілю. Такі заклади, як правило, мають висококваліфікованих фахівців з числа професорсько-викладацького складу та достатньо креативний студентський контингент. Компактна концентрація різнопрофільних висококваліфікованих спеціалістів на одній території та в одній організації є запорукою якісного та відповідального виконання завдання з ефективною модернізації підйомно-транспортного обладнання, як з точки зору енергоефективності, так і суттєвого підвищення якості технологічного процесу, різкого зменшення експлуатаційних витрат та збільшення показника надійності.

#### *Висновки.*

1. Враховуючи наявність значного парку застарілого підйомно-транспортного обладнання

металургійних підприємств України, що не модернізували протягом десятиліть, його різноманітність та різні умови експлуатації для досягнення мінімуму економічних витрат (за існуючих тотальних нестатків фінансів), найбільш доцільним є виконання модернізації за індивідуальними проектами із залученням наукового та інженерного потенціалу профільних вищих навчальних закладів.

2. Застосування транзисторних перетворювачів на основі потужних транзисторних IGBT модулів створює передумови для модернізації існуючих систем, електроприводів з достатньо малими капітальними витратами. При цьому така модернізація за техніко-економічним ефектом мало відрізняється від такого ж ефекту за повномасштабної модернізації з майже повним замінюванням існуючого електромеханічного обладнання.

3. Розвиток бездротових інформаційних систем та нового покоління датчиків фізичних величин дозволяє поруч з модернізацією енерговитратних силових кіл суттєво покращати як технологічну складову (плавність та точність позиціонування виконавчих органів), так і інформаційну складову роботи підйомно-транспортного обладнання (розвинена діагностика електромеханічного обладнання, дистанційний автоматизований безперервний контроль роботи механізмів).

### Бібліографічний список

1. **Рапутов, Б. М.** Электроприводы кранов металлургических предприятий [Текст] / Б. М. Рапутов. – М. : Металлургия, 1990. – 272 с.
2. **Островерхов, М. Я.** Конспект лекцій «Теорія електропривода» [Текст] / М. Я. Островерхов. – Київ : НТУУ «КПІ», 2002. – 203 с.
3. **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде «MATLAB» и «fuzzy-TECH» [Текст] / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : Изд-во БВХ, 2005. – 736 с.
4. **Техническая коллекция «Schneider Electric».** Проектирование электроприводов крановых механизмов. – 2009. – Выпуск 12. [Электронный ресурс]. - Режим доступа //www.schneider-electric.com – Вибірка 20.01.2017 р.
5. **Андрієнко, П. Д.** Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного двигателя [Текст] / П. Д. Андрієнко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 2. – С. 11–14.
6. **Дорошенко, А. Л.** Режимы работы та алгоритмы керування електромеханічними системами з машинами подвійного живлення та різними типами перетворювачів частоти [Текст] / А. Л. Дорошенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. – № 2. – С. 57-59.
7. **Мещеряков, В. Н.** Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением [Текст] / В. Н. Мещеряков, А. А. Соломатин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 11-16.
8. **Андрієнко, П. Д.** Анализ термической стойкости изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором при различных способах управления [Текст] / П. Д. Андрієнко, И. М. Коцур, М. И. Коцур // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 420-422.
9. **Benefits of Upgrading Existing Cranes** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // www: engineered lifting.com/magnetek. – Вибірка 20.01.2017 р.

10. **Сидоров, В. А.** Определение технического состояния механизмов подъема мостовых кранов по параметрам вибрации [Текст] / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, В. И. Руденко // Вісник Севастопольського національного технічного університету : збірник наук. праць – 2012. – Вип. 133. Серія: «Механіка, енергетика, екологія». – С. 90-96.

**БОНДАРЬ ВАДИМ ЮРЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: bwju1939@meta.ua

### **АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УКРАИНЫ**

Выполнен анализ проблемы повышения энергоэффективности, улучшение эксплуатационных режимов и общей экономичности эксплуатации подъемно-транспортного оборудования и, особенно, модернизации мостовых подъемных кранов металлургических предприятий Украины. Предложены инженерные решения указанных проблем с минимальными финансовыми и временными затратами.

Ключевые слова: мостовые подъемные краны, электропривод, энергоэффективность, силовые резисторы, IGBT модули

**BONDAR' VADIM** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electronic Systems, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: bwju1939@meta.ua

### **ANALYSIS OF MODERNIZATION PROBLEMS FOR LIFTING-TRANSPORT EQUIPMENT OF METALLURGICAL PLANTS OF UKRAINE**

The analysis of the problem of increasing energy efficiency, improvement modes and general economy of exploitation for elevating transport equipment and, In particular, modernization of bridge elevating cranes for metallurgical plants of Ukraine is carried out. The engineering solutions for mentioned problems with minimal financial and time costs are offered.

Keywords: bridge elevating cranes, electric drive, energy efficiency, power resistors, IGBT modules

Стаття надійшла до редакції 25.01.2017 р.  
Рецензент, проф. Т.В. Критська

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>