

УДК 621.316.71

**Коцур М. И.**, канд. техн. наук,  
**Андрienко А. А.**,  
**Андрienко Д. С.**,  
**Немыкина О. В.**

### РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

***Аннотация.** Предложена система асинхронного электропривода двигателей с фазным ротором, которая может быть альтернативой частотно-регулируемого электропривода. Физический эксперимент данного электропривода с трехфазным автономным инвертором для рекуперации энергии в сеть подтверждает возможность обеспечить высокий коэффициент мощности и коэффициент полезного действия при приемлемой электромагнитной совместимости.*

***Ключевые слова:** преобразователь, регулирование, двигатель, рекуперация, скорость, частота, кран, инвертор, энергоэффективность, скольжение.*

**Коцур М. І.**, канд. техн. наук,  
**Андрієнко А. А.**,  
**Андрієнко Д. С.**,  
**Немикіна О. В.**

### РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД С ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

***Аннотация.** Запропоновано систему асинхронного електроприводу двигунів з фазним ротором, яка може бути альтернативою частотно-регульованого електроприводу. Фізичний експеримент даного електроприводу з трифазним автономним інвертором для рекуператії енергії в мережу підтверджує можливість забезпечення високого коефіцієнта потужності і коефіцієнта корисної дії при прийнятній електромагнітній сумісності.*

***Ключові слова:** перетворювач, регулювання, двигун, рекуператія, швидкість, частота, кран, інвертор, енергоефективність, ковзання.*

**Kotsur M. I.**, PhD,  
**Andrienko A. A.**,  
**Andrienko D. S.**,  
**Nemukina O. V.**

### REGULATED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH IMPROVED CHARACTERISTICS

***Abstract.** The system of asynchronous electric motors with phase rotor, which can be an alternative to variable frequency drive. The physical experiment of the electric three-phase inverter for energy recuperation into the power grid confirms the ability to provide a high power factor and efficiency at an acceptable electromagnetic compatibility.*

***Keywords:** converter, regulation, motor recuperation, speed, frequency, crane, inverter, energy efficiency, slip.*

**Введение.** Основная масса эксплуатируемых кранов имеет электропривод с релейно-контакторным управлением в цепи ротора асинхронного двигателя, имеющий ряд известных существенных недостатков, а именно: отсутствие плавного хода, повышенные динамические нагрузки на элементы механизмов и несущей балки, низкий КПД. Устранение указанных недостатков при модернизации кранов осуществляется применением частотно-регулируемых электроприводов, имеющих относительно высокую стоимость, а также необходимость использова-

ния датчиков частоты вращения для реализации многодвигательных механизмов передвижения мостов, тележек [1-3].

В [4] предложена схема преобразователя электропривода согласованного вращения асинхронных двигателей с фазным ротором. Данный электропривод обладает относительной простотой схемного решения, высоким КПД, а также возможность обеспечить плавность пуска и регулирование частоты вращения без применения датчиков частоты вращения ротора асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Однако данная си-

стема регулирования имеет ограничение в получении максимального значения коэффициента мощности электропривода, что обусловлено наличием инвертора, ведомого сетью, работающего с постоянным (минимальным) углом опережения в режиме рекуперации энергии скольжения ротора [5-6]. Поэтому актуальной задачей является усовершенствование данного преобразователя, связанное с повышением коэффициента мощности электропривода с обеспечением удовлетворительной электромагнитной совместимости с сетью.

**Целью работы** является усовершенствование схемного решения регулируемого асинхронного электропривода с АДФР, а также разработка алгоритмов управления, обеспечивающие повышение коэффициента мощности электропривода.

**Основные результаты.** На рис. 1 приведена усовершенствованная схема электропривода с АДФР [7-8].

Исследуемый преобразователь содержит следующие структурные блоки: выпрямитель (В), импульсный преобразователь повышающего напряжения (ИППН), трехфазный автономный инвертор напряжения (ТАИН), имеющий синхронизацию с питающей сетью и обеспечивающий рекуперацию энергии скольжения ротора в сеть.

Наличие автономного инвертора позволяет обеспечить рекуперацию энергии в сеть с требуемым коэффициентом мощности. При этом для данного электропривода возможны два режима:

а) режим активного выпрямителя с требуемым коэффициентом мощности и синусоидальной модуляцией;

б) режим активного выпрямителя с прямоугольным током рекуперации [9].

Для выбора способа управления инвертором, необходимо учитывать, что крановые двигатели имеют относительно низкий коэффициент мощности:  $0,65 \div 0,85$  (в номинальном режиме),  $0,04 \div 0,39$  (в режиме холостого хода). При этом, ток холостого хода соизмерим с током статора, что обусловлено относительно высокой индуктивностью воздушного зазора.

Суммарный потребляемый ток электропривода определяется током статора и током инвертора. Для обеспечения минимизации потерь в системе электропитания кранов, необходимо чтобы коэффициент мощности привода был близок к единице ( $\cos \varphi = 1$ ).

Поскольку снижение коэффициента мощности двигателя обусловлено реактивной составляющей мощности АДФР, основную долю которой определяет ток намагничивания, то для ее компенсации целесообразно выполнить корректировку угла фазового сдвига между напряжением инвертора и напряжением сети.

Напряжение на входе инвертора определяется из выражения [10]:

$$U_{du} = 1,35 \sqrt{U_{ds}^2 + (\omega L_{\phi} I_{u(1)})^2} \quad (1)$$

где  $U_{ds}$  - напряжение сети электропитания кранов;

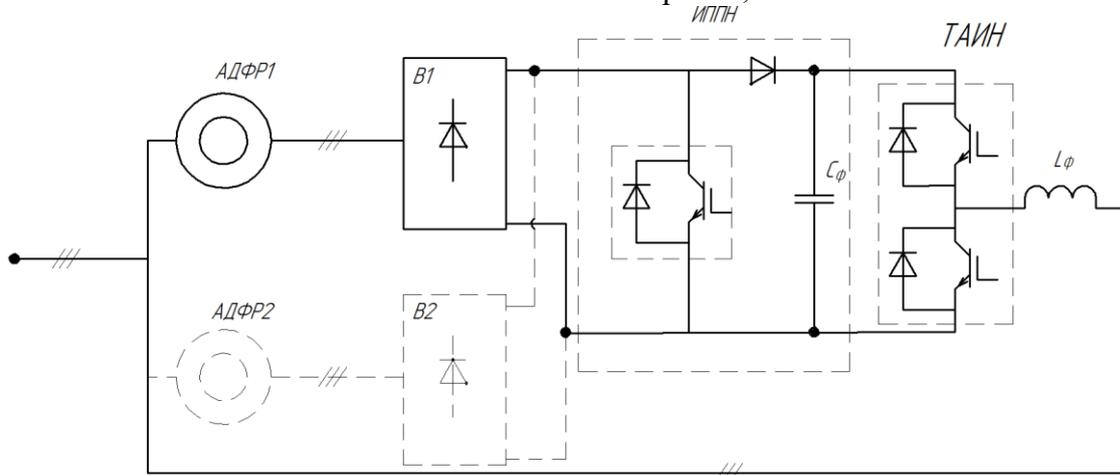


Рис. 1. Усовершенствованная схема асинхронного электропривода двигателей с фазным ротором

$I_{u(1)}$  – выходной ток инвертора.

Величину выходного тока инвертора можно получить из следующего выражения:

$$I_{u(1)} = \sqrt{I_m^2 + I_{ua}^2} \quad (2)$$

где  $I_{ua}$  – активная составляющая тока рекуперации энергии скольжения ротора АДФР.

При пуске АДФР диапазон изменения активной составляющей тока рекуперации определяется соотношением выпрямленного напряжения выпрямителя ротора АДФР и ЭДС холостого хода, определяемой напряжением сети.

Как известно использование инвертора с синусоидальной модуляцией требует повышения напряжения на входе выпрямителя на величину  $1/0,612 \approx 1,63$ . Это приводит к увеличению установленной мощности конденсаторов фильтра, фазного реактора  $L_\phi$ , усиленному воздействию блуждающий фронт-овых импульсов на изоляцию обмотки ротора АДФР, а также увеличению стоимости самого преобразователя. Предложенная система электропривода лишена этих недостатков за счет использования активного фильтра с формированием прямоугольного фазного тока. Работа ключей преобразователя синхронизирована с работой соответствующих им тиристоров, регулируемый ток формируется методом ШИР в виде прямоугольного тока, амплитуда которого определяется мощностью скольжения ротора АДФР и напряжением в звене постоянного тока.

В табл. 1. приведены результаты физического эксперимента асинхронного электропривода согласованного вращения, проведенного на мостовом кране 2ПЗ0/5, зав. №338 предприятия ПАО "Запорожкран" для механизма передвижения тележки. В качестве регулируемого привода использовался преобразователь МПЧ-ТТП-160-380-50, с двумя АДФР типа МТН-211-6, мощностью по 7,5 кВт каждый. Роторные выпрямители АДФР включены параллельно (рис. 1.) [7-8]. Передвижение моста осуществлялось без груза на двух позициях контроллера. Пози-

ция I контроллера обеспечивает скорость вращения ротора равной 10% от полной. Позиция IV контроллера обеспечивает полную скорость АДФР при полностью закороченном роторе.

Табл. 1 – Результаты физического эксперимента

Позиция контроллера	электропривод с релейно-контакторным управлением в цепи ротора АДФР				
	$U_\phi$	$P_\phi$	$I_\phi$	$S_\phi$	$\cos\phi$
	В	Вт	А	ВА	о.е.
I	230	3000	43	9890	0,3
IV	230	2800	40	9200	0,3
	электропривод с инвертором ведомым сетью				
I	230	1400	38	8700	0,16
IV	230	3000	40	9200	0,326
	электропривод с трехфазным автономным инвертором напряжения				
I	230	1350	28	4150	0,325
IV	230	2500	13	3050	0,82

Анализ результатов, полученных с помощью физического эксперимента показывает, что при использовании автономного инвертора напряжения получен эффект компенсации реактивной мощности, потребляемой АДФР из сети. При работе АДФР на полной скорости (позиция контроллера IV) коэффициент мощности по сравнению с электроприводом, имеющего ведомый сетью инвертор, возрастает в 2,5 раза. В диапазоне низкой частоты вращения ротора АДФР (позиция контроллера I) данный эффект незначителен. Использование автономного инвертора с формированием прямоугольного тока и входной индуктивности 0,5мГн также обеспечивает удовлетворительную совместимость с сетью. В установившемся режиме работы на IV позиции контроллера, коэффициент гармонических искажений по току равен 7,07%, а коэффициент гармонических искажений по напряжению 1,2%, что соответствует требованиям МЭК.

Существенным отличием исследуемого электропривода от частотного заключается в

том, что в последнем установленная мощность оборудования определяется режимом с номинальной нагрузкой, а установленная мощность рассматриваемого электропривода определяется мощностью скольжения ротора и величиной реактивного тока АДФР.

### Выводы

Предложена система асинхронного электропривода согласованного вращения роторов двигателей с фазным ротором с повышенными показателями энергоэффективности.

Предложенный электропривод с АДФР позволяет обеспечивать повышение коэффициента полезного действия, коэффициента мощности электропривода, а также получить удовлетворительную электромагнитную совместимость с сетью при относительно малой себестоимости. Для многодвигательного электропривода эффективность от применения увеличивается в большей степени.

### Список использованной литературы

1. Terede, G. Speed, flux and torque estimation of induction motor drives with adaptive system model [Text] / G. Terede, R. Belmans // IEEE Transactions Power electronics, machines and drives, 2002. – P. 498–503

2. Amin, A. Induction Motors. Analysis and Torque Control [Text] / A. Amin, D. Bahram // Series: Power Systems. – 2001. – Vol. XV. – P. 262.

3. Aaltonen, M. Direct torque control of AC motor drives [Text] / M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Lalu, S. Heikkila // ABB Reviev. – 1995. – Vol. 3. – P. 19–24.

4. Пат. Україна 64126, МПК Н02Р 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андрієнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл.25.10.2011, Бюл. №20, 2011р. – Режим доступу: <http://www.uipv.org/>

5. Коцур М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андрієнко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – 2013 - №4-

2. – С.114-120.

6. Kotsur M. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors [Text] / M. Kotsur, P. Andrienko, O. Bliznyakov, A. Andrienko, D. Andrienko // Electrotechnic and Computer Systems. – 2015. - № 19 (95). – P. 14 – 17.

7. Заявка а 2015 10485. Україна, МКИ Н02Р5/74 Двродвигуновий електропривід імпульсного регулювання асинхронних двигунів з фазними роторами [Текст] / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, Д. О. Кулагін, І. М. Коцур, Д. С. Андрієнко, А. А. Андрієнко; заявл. та патентовласник ЗНТУ; заяв. 28.10.2015. – Режим доступу: <http://www.uipv.org/>

8. Заявка а 2015 10484. Україна, МКИ Н02Р5/74 Двродвигуновий електропривід імпульсного регулювання узгодженого обертання асинхронних двигунів з фазними роторами [Текст] / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, Д. О. Кулагін, І. М. Коцур, Д. С. Андрієнко, А. А. Андрієнко; заявл. та патентовласник ЗНТУ; заяв. 28.10.2015. – Режим доступу: <http://www.uipv.org/>

9. Немикіна О. В. Підвищення ефективності системи електроживлення кранів з частотно-регульованим приводом [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.09.03 / Немикіна Ольга Володимирівна. – Одеса, 2016. – 19 с.

10. Шавьолкін О.О. Перетворювальна техніка: навч. посіб. [Текст] / О. О. Шавьолкін, О.М. Наливайко. – Краматорськ: ДД-МА, 2008. – 328 с.

Получено 05.05.2016

### References

1. Terede G., Belmans R. (2002). Speed, flux and torque estimation of induction motor drives with adaptive system model. *International conference on Power electronics, machines and drives*, P. 498–503.

2. Amin A., Bahram, D. (2001). Induction Motors. Analysis and Torque Control. *Series: Power Systems*, XV, 262.

3. Aaltonen, M., Tiitinen, P., Lalu, J., Heikkila, S. (1995). Direct torque control of AC motor drives. *ABB Reviev*, 3, 19–24.

4. Andrienko P.D., Kotsur M.I., Kotsur I.M. Patent Ukraine 64126, H02P 27/05(2006.01) Prustriy impulsnogo keruvannya procesamu peretvorennaya energii v asynchronomy dvuguni z phaznum rotorom [The device impulse control processes energy transformation in asynchronous motor with phase rotor] (Electronic resource); Declared. 22.04.11; Published .25.10.2011, Newsletter No. 20, (2011). – URL: <http://www.uipv.org/> (In Ukraine)

5. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I.M. Sravnitelniy analiz energoeffektivnosti system regulirovaniya AD s faznim rotorom [Comparative Analysis of the Efficiency of Regulator System am with phase rotor], (2012), *Polzunovskiy Vestnik*, No3 (19), P114-120 (In russian).

6. Kotsur M. Andrienko P., Bliznyakov O., Andrienko A., Andrienko D. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors (2015) *Electrotechnic and Computer Systems*. - № 19 (95). – P. 14 – 17.

7. Kotsur M. I., P. D. Andrienko, D. O. Kulagin, I. M. Kotsur, D. S. Andrienko, A. A. Andrienko Order on Patent Ukraine 10485, H02P5/74 Dvodvugunovuy elektropruid impulsnogo reguluvannya asynchronnuch dvuguniv z faznumu rotoramu [Two-motors electric drive pulse regulation of asynchronous motors with phase rotor] (2015) *applicant and patentee ZNTU*; Declared. 28.10.2015. – URL: <http://www.uipv.org/> (In Ukraine)

8. Kotsur M. I., P. D. Andrienko, D. O. Kulagin, I. M. Kotsur, D. S. Andrienko, A. A. Andrienko Order on Patent Ukraine 10484. H02P5/74 Dvodvugunovuy elektropruid impulsnogo reguluvannya uzgodzhenogo ober-tannya agreed rotation asynchronnuch dvuguniv z faznumu rotoramu [Two-motors pulsed electric drive the agreed regulation of rotation of asynchronous motors with phase rotor] (2015) *applicant and patentee ZNTU*; Declared. 28.10.2015. – URL: <http://www.uipv.org/> (In Ukraine)

9. Nemukina O. V. Pidvushennya efektuvnosti systemu elektrozhuvlennya kraniv z chastotnum pruvodom [Improving the efficiency of supply cranes with frequency-regulated drive] (2016): abstract for the degree of kand. tech. on specialty: 05.09.03, Odesa – 19 p. (In Ukraine)

10. Shavelkin O. O., Naluva`ko O.M. Peretvoruvai`na texnika [Transforming equipment] (2008) Kramators`k: DDMA – 328 p. (In Ukraine)



Коцур Михаил Игоревич, канд. техн. наук, доцент каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, ул. Жуковского 64, 69063 т. (061)769-82-50  
E-mail: [kotsur\\_m@ukr.net](mailto:kotsur_m@ukr.net)



Андрienко Андрей Андреевич, аспирант каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, ул. Жуковского 64, 69063  
E-mail: [vamoseandrey@mail.ru](mailto:vamoseandrey@mail.ru)



Андрienко Данил Сергеевич, аспирант каф. электроснабжения промышленных предприятий Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, ул. Жуковского 64, 69063  
E-mail: [andr.d@ukr.net](mailto:andr.d@ukr.net)



Немыкина Ольга Владимировна, ассистент каф. электроснабжения промышленных предприятий Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, ул. Жуковского 64, 69063