

УДК 621.316.71

**П. Д. Андрієнко**, д-р техн. наук,  
**Д. С. Андрієнко**,  
**М. І. Коцур**, **С. В. Калюжний**, кандидати техн. наук

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

**Аннотация.** Показана возможность энергоэффективного торможения при противовключении асинхронного двигателя с фазным ротором в модифицированной схеме импульсно-токового регулирования скорости вращения.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с фазным ротором, режим противовключения, имитационная модель, импульсное регулирование

**P. D. Andrienko**, ScD.,  
**D. S. Andrienko**,  
**M. I. Kotsur**, PhD., **S. V. Kalyuzhny**, PhD.

### ENERGY EFFICIENT BRAKE AT APPOSITE ACTIVATE ASINCHRONOUS MOTOR WITH PHASE-WOUND ROTOR

**Annotation.** The possibility of providing of energy efficiency braking with help opposed action mode in pulse control system of asynchronous motors with phase rotor is shown.

It is shown waveforms of simulation modeling. It is shown that to reduce the multiplicity of the moment when the reverse is necessary to regulate the rate of change of set point current limiting at the beginning of the braking process.

**Keywords:** asynchronous motor with phase-wound rotor, appositive activate, simulation modeling, pulse regulation

**П. Д. Андрієнко**, д-р техн. наук,  
**Д. С. Андрієнко**,  
**М. І. Коцур**, **С. В. Калюжний**, кандидати техн. наук

### ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ПРОТИВКЛЮЧЕННЯМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

**Анотація.** Показана можливість енергоефективного гальмування при противключенні асинхронного двигуна з фазним ротором у модифікованій схемі імпульсного регулювання швидкості обертання

**Ключові слова:** асинхронний двигун з фазним ротором, режим противключення, імітаційна модель, імпульсне регулювання

**Вступлення.** Основная масса крановых установок, находящаяся в эксплуатации, использует релейно-контакторное управление асинхронным двигателем (АД) с фазным ротором. Помимо энергетических потерь, указанное управление вызывает дополнительные механические нагрузки в элементах конструкции крана, которые ускоряют процесс их разрушения и, соответственно, снижают срок службы и увеличивают расходы на эксплуатацию.

В связи с этим возникает проблема модернизации электроприводов при одновременном продлении срока службы механической конструкции.

**Обзор материалов.** В [1, 2, 5, 7, 10] были показаны пути усовершенствования схемы импульсного регулирования (ИР) частоты вращения АД с фазным ротором, обеспечивающие плавность разгона электропривода при высокой энергоэффективности и электромагнитной совместимости с сетью.

**Цель работы.** В настоящей статье показана возможность обеспечения повышения эффективности торможения в режиме противовключения АД с фазным ротором по схеме рис. 1.

© Андрієнко П.Д., Андрієнко Д.С., Коцур М.І.,  
Калюжний С. В., 2014

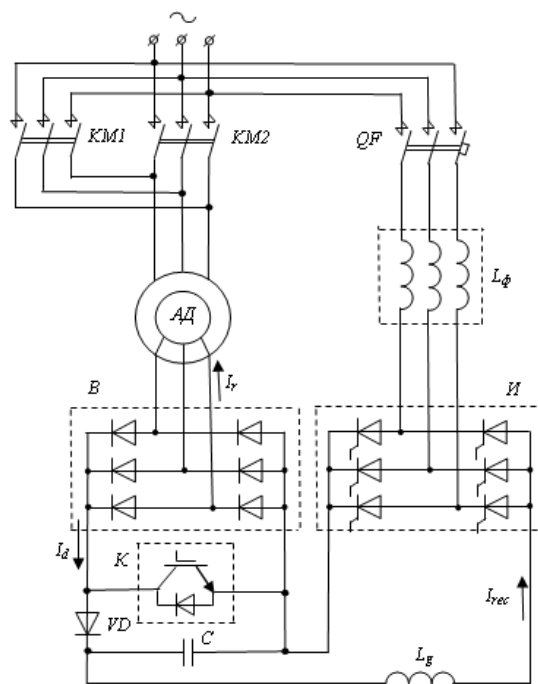


Рис. 1. Принципиальная схема модифицированной системы ИРАД

**Основные результаты исследований.** В схеме (рис. 1) ключ К работает в режиме поддержания постоянной амплитуды тока ротора, индуктивность обмоток ротора, диод VD и конденсатор С образуют цепь преобразователя повышающего напряжения. Ведомый сетью инвертор И работает с постоянным углом опережения

$$B = \text{const} = \delta + \gamma, \quad (1)$$

где  $\delta$  – запас по углу инвертирования  $\delta \approx 10$  град.;  
 $\gamma$  – угол коммутации.

Необходимым условием успешной рекуперации при противовключении является соотношение

$$1,35 E_p (2-s) \leq 1,35 U_n \cos(\beta - \gamma), \quad (2)$$

где  $E_p$ ,  $U_n$  – действующие значения ЭДС ротора и линейного напряжения сети (вторичной обмотки трансформатора);  $s$  – скольжение двигателя.

Работа инвертора с постоянным  $\beta$  или минимальным  $\delta$  углом опережения обеспечивает высокий коэффициент мощности  $\cos \varphi$  по основной гармонике, определяемый соотношением

$$\cos \varphi \approx \cos(\beta - \gamma/2). \quad (3)$$

В случае нарушения условия (2) в цепь выпрямленного тока ротора необходимо установить резистор, который при заданном токе должен снизить напряжение до допустимого значения. Для основной массы крановых двигателей условие (2) выполняется автоматически, если инвертор подключается к сети 380 В без трансформатора.

На имитационной модели были получены осциллограммы (рис. 2 и рис. 3) процесса торможения противовключением АД типа МТФ-111-6 при напряжении сети  $U_n = 380$  В.

Анализ осциллограмм рис. 2 показывает, что в установившемся режиме инвертируемый ток имеет прерывистый характер. Выпрямленный ток ротора модулирован частотой скольжения. В режиме рекуперации выпрямленный ток ротора определяется величиной гистерезиса уставки тока, среднее значение которого является величиной постоянной.

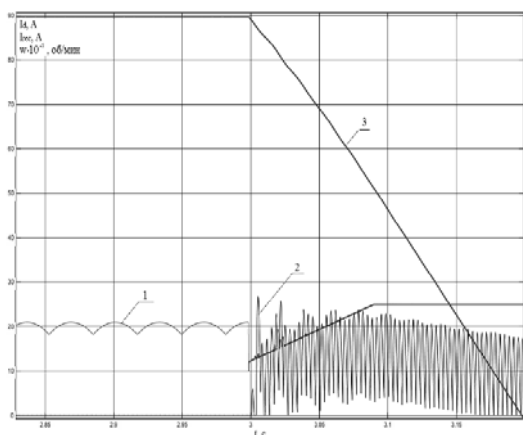


Рис. 2. Осциллограммы токов и скорости при торможении  $I_d$  – выпрямленный ток ротора (1);  $I_{rec}$  – ток инвертора (ток рекуперации) (2);  $\omega$  – скорость вращения ротора (3)

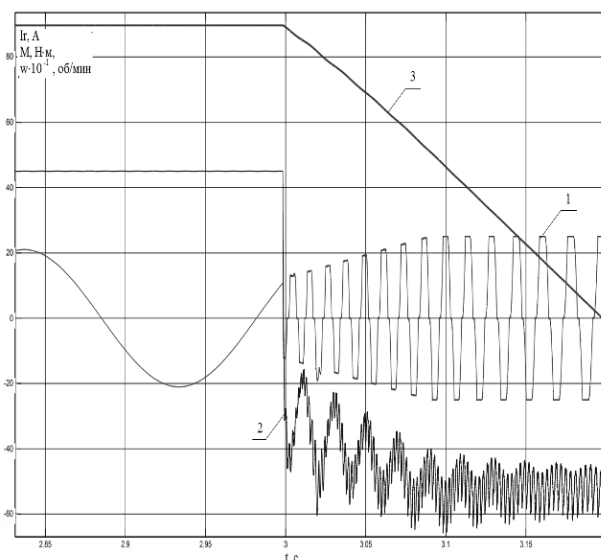


Рис. 3. Осциллограммы тока, момента и скорости при торможении противовключением:

$I_r$  – ток ротора (МТФ-111-6) (1);  $M$  – электромагнитный момент (2);  $\omega$  – скорость вращения ротора (3)

Анализ осциллограмм рис. 2 и рис. 3 подтверждает, что предложенная схема обеспечивает режим рекуперации энергии в сеть при торможении противовключением.

Исследования на модели также показывают, что при реверсе фаз и постоянном токе ротора наблюдаются значительные колебания амплитуды момента, связанные с наличием апериодической составляющей потока намагничивания при его реверсе, величина которого зависит от фазы напряжения в момент реверса [5, 6, 8, 9]. Для устранения указанного недостатка необходимо использовать гибридный контактор с контролем фазы реверса. Другим, более рациональным способом, является использование задатчика интенсивности в цепи задания тока уставки токоограничения, что позволяет исключить значительные амплитуды момента двигателя (рис. 3).

**Выводы.** Таким образом, использование предложенной схемы позволяет обеспечить энергоэффективное управление режимами работы крановых механизмов при их модернизации.

#### Список использованной литературы

1. Коцур М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования АД с фазным ротором / М. И. Коцур, П. Д. Андрienко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – Барнаул : Алт. ГТУ. – 2012. – № 4. – С. 114 – 120.
2. Коцур М. И. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования АД с фазным ротором / М. И. Коцур, П. Д. Андрienко, И. М. Коцур // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи* – Кременчук : КрНУ – 2012. – № 3 (19) – С.163 – 165.
3. Патент України 64126, МПК H02P 27/05 (2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П. Д. Андріє-

нко, М. І. Коцур, І. М. Коцур; заяв. 22.04.11; опубл. 25.10.11, Бюл. № 20, 2011. – Режим доступу : <http://WWW.ukrpatent.org> – Дата доступа (22.04.11).

4. Aaltonen M., Tiitinen P., Lalu J., and Heikkilä S., (1995), Direct Torque Control of AC Motor Drives, *FDD Reviev*, No. 3, pp. 19 – 24.

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

6. Busschots F., Renier D., and Belmans R. Direct Torque Control: Application to Crane Drives, (1997), *7<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Trondheim*, Norway, September 8–10, 1997; pp. 4579 – 4584.

7. Donald W., Novotny A., and Frederick P., (1968), The Analysis of Induction Machines Controlled by Series Connected Semiconductor Switches, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, February, Vol. PAS-87, No. 2, pp. 597 – 605.

8. Godfrey F.R., (1981), New Variable Speed Drive System for Cranes, *BHP Techn. Bull.*, 25 H2, pp. 81 – 83.

9. Terede G., and Belmans R., (2002), Speed, Flux and Torque Estimation of Induction Motor Drives with Adaptive System Model, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bath, UK*, April 16 – 18, pp. 498 – 503.

10. Коцур М. І. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора / М. І. Коцур // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук : КрНУ. – 2011. – № 2 (14). – С. 86 – 89.

Получено 07.06.2014

#### References

1. Kotsur M.I., Andrienko P.D., and Kotsur I.M. Sravnitelnyy analiz energoeffektivnosti system regulirovaniya AD s faznim rotorom [Comparative Analysis of the Efficiency of Regulatory Systems am with phase-wound Rotor], (2012), *Polzunovsky Vestnik*, Barnaul, Russian Federation, Alt. GTU, No. 3 (19), pp. 114 – 120 (In Russian).

2. Kotsur M.I., Andrienko P.D., and Kotsur I.M. Osobennosti rezhimov raboti modifitsirovannoy sistemi impulsnogo regulirovaniya AD s faznim rotorom, [Features of Operation Modes of the Modified System Pulse Regulation AM with phase-wound Rotor], (2012), *Elektromehanichni and Energozberigayuchi Sistemi*, Kremenchug, Ukraine, *KrNU*, No. 3 (19), pp.163 – 165 (In Russian).

3. Andrienko P.D., Kotsur M.I., and Kotsur I.M. Patent Ukraine 64126, МПК H02P 27/05 (2006.01). Pristriy impulsnogo keruvannya procesami peretvorenniya energii v asinhronnomu dviguni z faznim rotorom, [The unit Impulse Control Processes of Energy Transformation in the Asynchronous Engine with a Phase-Wound Rotor] (Electronic resource); Declared 22.04.11; Published 25.10.11, Newsletter No.20, 2011. Mode of access: <http://WWW.ukrpatent.org> (22.04.11) (In Ukrainian).

4. Aaltonen M., Tiitinen P., Lalu J., and Heikkilä S., (1995), Direct Torque Control of AC Motor Drives, *FDD Reviev*, No. 3, pp.19 – 24.

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

6. Busschots F., Renier D., and Belmans R., (1997), Direct Torque Control: Application to Crane Drives, *7<sup>th</sup> European conference on power electronics and applications EPE*, Trondheim, Norway, September 8–10, 1997; pp. 4579 – 4584.

7. Donald W., Novotny A., and Frederick P., (1968), The Analysis of Induction Machines Controlled by Series Connected Semiconductor Switches, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, February, Vol. PAS-87, No. 2, pp. 597 – 605.

8. Godfrey F.R., (1981), New Variable Speed Drives System for Cranes, *BHP Techn. Bull.*, 25 H2, pp. 81 – 83.

9. Terede G., and Belmans R., (2002), Speed, Flux and Torque Estimation of Induction Motor Drives with Adaptive System Model, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bath, UK*, April 16–18, 2002, pp. 498 – 503.

10. Kotsur M.I. Povishenie energoeffektivnosti shemi impulsnogo regulirovaniya v tsepi vipryzmlennogo toka rotora [Increasing Energy Efficiency Scheme Importnogo Regulation in the Rectifier Current Circuit Rotor], (2011), *Elektromehanichni and Energozberigayuchi sistemi*, Kremenchuk, Ukraine, *KrNU*, No. 2 (14), pp. 86 – 89 (In Russian).



Андриенко  
Петр Дмитриевич, д-р техн. наук, зав. каф. электрических аппаратов Запорожского нац. технич. ун-та. г. Запорожье, ул. Жуковского. Тел.: (061) 764-46-25. E-mail: andrpd@ukr.net



Калюжный  
Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц. каф. горной энергомеханики и оборудования Донбасского государственного технич. ун-та. E-mail: gemio.kafedra@yandex.ru



Коцур  
Михаил Игоревич, канд. техн. наук, доц. каф. электрических аппаратов Запорожского нац. технич. ун-та. Тел.: (061)-769-83-95. E-mail:kotsur\_m@ukr.net



Андриенко  
Данил Сергеевич, аспирант каф. электрических аппаратов Запорожского нац. технич. ун-та. Тел.: 066-17-68-363. E-mail: andr.d@ukr.net