

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_07

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРАНОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

**М.А. Авербух**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Белгород, Россия  
avers45@rambler.ru

**А.Д. Кузнецова**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Белгород, Россия  
kuznetsova.alvina@yandex.ru

Представлено имитационное моделирование частотного кранового электропривода с заменой неуправляемого выпрямителя (НВ) на входе преобразователя частоты на управляемый активный выпрямитель (АВ) в системе «Полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» (ППЧ-АД) в среде *Matlab/Simulink*. Электроснабжение основных механизмов осуществляется от понижающего трансформатора, который, в свою очередь, является согласующим трансформатором для частотных электроприводов механизмов подъема, передвижения тележки и передвижения крана. Имитационная модель построена в соответствии с реальной схемой электроснабжения и электропривода подъема мостового крана. Управление автономным инвертором напряжения ППЧ построено по векторному принципу со стабилизацией потокосцепления ротора. Результаты имитационного моделирования подтвердили возможность использования АВ взамен НВ в системе ППЧ-АД. При этом динамические процессы в электроприводе при подъеме груза удовлетворяют техническим требованиям к крановым электроприводам. С помощью имитационного моделирования произведена оценка коэффициента мощности на входе АВ. Результаты моделирования подтверждают его повышение в сравнении со схемой с НВ.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель, имитационное моделирование, коэффициент мощности, кран, частотный электропривод, электропривод, электропривод подъема.

**Для цитирования:** Авербух М.А., Кузнецова А.Д. Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 7-18. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_07.

## **SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN CRANE ELECTRIC DRIVE WITH ACTIVE RECTIFIER**

**M.A. Averbukh**

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov  
Belgorod, Russia  
avers45@rambler.ru

**A.D. Kuznetsova**

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov  
Belgorod, Russia  
kuznetsova.alvina@yandex.ru

**Abstract.** The features of simulation for variable frequency crane drive with the replacement of an uncontrolled rectifier at the input of the frequency converter with a controlled active front-end (AFE) in the semiconductor frequency converter-asynchronous squirrel cage motor system (SFC-AM) in Matlab/Simulink are presented in this paper. The main mechanisms are powered by the step-down transformer, which one, for its part, is a matching transformer for variable frequency drives of lifting mechanisms, trolley and crane movement. The simulation model is built in accordance with the real scheme of power supply and electric drive for lifting an overhead crane. The SFC autonomous voltage inverter regulation is built on the vector control principle with the rotor flux linkage stabilization. The vector control method is also applied for the AFE control. The simulation modelling results confirmed the possibility of using AFE instead of the uncontrolled rectifier in the SFC-AM system. At the same time, the dynamic processes in the electric drive of lifting mechanisms meet the technical requirements for the electric crane drives. By the simulation, the power factor was estimated at the AFE input and the results confirm its increase in comparison with the circuit with the uncontrolled rectifier.

**Keywords:** active front-end, crane, electric drive, electric drive for lifting, power factor, simulation, variable frequency drive.

**For citation:** M.A. Averbukh and A.D. Kuznetsova, “Simulation of dynamic processes in crane electric drive with active rectifier”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 7-18, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_07.

## 1. Введение

В настоящее время все большее распространение получает крановый электропривод на базе полупроводникового преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД). Применение таких электроприводов в сравнении с электроприводами постоянного тока имеет ряд преимуществ:

- отсутствие щеточно-коллекторного узла;
- отсутствие требований дополнительного узла возбуждения;
- высокая надежность и простота конструкции;
- меньшие габариты и момент инерции при одинаковых мощностях двигателей [1-4].

Вместе с тем, следует отметить существенные недостатки применения неуправляемых выпрямителей (НВ) на входе (ППЧ) [5-7]:

- генерация высших гармоник тока и напряжения в питающую сеть;
- ухудшение коэффициента мощности сети со стороны переменного тока;
- отсутствие возможности осуществлять рекуперацию энергии без дополнительных блоков.

Перечисленные недостатки отсутствуют в системе частотного электропривода, если на входе ППЧ устанавливается активный выпрямитель (АВ), построенный аналогично автономному инвертору напряжения (АИН) с преобразованием трехфазного входного напряжения в постоянное управляемое выходное напряжение [8]. Замена НВ на АВ позволяет повысить КПД всей системы электропривода за счет возможности рекуперации энергии в питающую сеть и снижения потребления реактивной мощности.

Целью работы является оценка возможности использования АВ в частотном электроприводе с учетом режимов работы кранового электропривода подъема путем имитационного моделирования в *Matlab/Simulink*.

## II. Характеристика кранового электропривода подъема

Основной особенностью мостовых кранов является одновременность работы электроприводов подъема крана, перемещения крана и перемещения тележки. Выполнение необходимых диаграмм движения осуществляется за счет частотного электропривода. Преобладание цикличности работы крановых электроприводов со значительным периодом длительности переходных процессов способствует генерированию в питающую сеть высших гармонических составляющих токов и напряжений.

В табл. 1 представлены основные параметры и технические характеристики электрического мостового крана общего назначения грузоподъемностью 16 т с режимом работы А5 и кабиной закрытого типа.

Таблица 1.  
 Параметры и технические характеристики мостового крана

Table 1.  
 Parameters and technical characteristics of the overhead crane

№ п/п	Наименование параметра, единицы измерения	Значения параметров
1	Грузоподъемность, т	16
2	Пролет крана $L_k$ , м	16,5
3	Диапазон подъема $H_{гд}$ , м	20
4	Режим работы крана	A5
5	Управление краном	от пола
6	Скорость подъема крана/ревизии, м/с	0,067/0,017
7	Скорость передвижения крана, м/с	0,88
8	Скорость передвижения тележки, м/с	0,5

На рис. 1 представлена схема электроснабжения крановых механизмов.

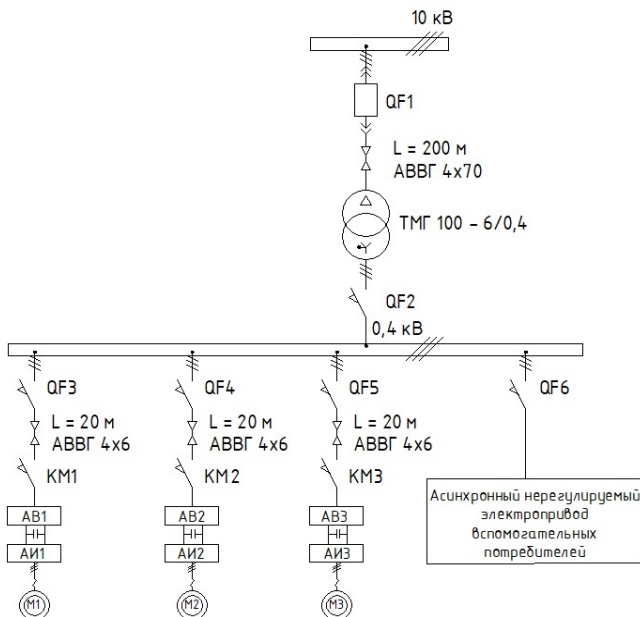


Рис. 1. Схема электроснабжения крановых механизмов

Fig. 1. Power supply diagram of crane mechanisms

Обозначения на рис. 1:  $QF1$  – вакуумный выключатель на стороне 10 кВ;  $QF2$  – вводной автоматический выключатель на стороне 0,4 кВ;  $QF3$ - $QF6$  – автоматические выключатели потребителей;  $KM1$ - $KM3$  – контакторы; АВ1-АВ3 и АИ1-АИ3 – активные выпрямители на входе и автономные инверторы напряжения в составе каждого из трех ППЧ соответственно;  $M1$ - $M3$  – электроприводы подъема, передвижения крана и передвижения тележки соответственно.

Как следует из рис. 1, питание крановых электроприводов осуществляется через понижающий трансформатор, который одновременно является и согласующим. В табл. 2 представлены паспортные данные крановых электродвигателей и понижающего трансформатора. Для электродвигателя подъема приводятся параметры обмоток статора и ротора в именованных единицах.

Таблица 2.  
Технические параметры крановых электродвигателей и понижающего трансформатора

Table 2.  
Technical parameters of crane electric motors and step-down transformer

№ п/п	Тип двигателя	Паспортные данные					
		$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$f_n$ , Гц	КПД <sub>n</sub> , %	cosφ <sub>n</sub> , о.е.	$n_n$ , об/мин
1.	Двигатель передвижения крана 7FMTK132M6	360* (380)	7,2	47* (50)	85,1	0,83	901
2.	Двигатель передвижения тележки 7FMTK132S6	360* (380)	5,35	47* (50)	83,5	0,84	897
3.	Двигатель подъема 7FMTK200M6	360* (380)	22	47* (50)	89,6	0,87	914
		Параметры обмоток статора и ротора в именованных единицах					
		$R1$ , Ом	$R2'$ , Ом	$X1$ , Ом	$X2'$ , Ом	$X_M$ , Ом	
		0,207	0,124	0,398	0,861	16,36	
	<b>Тип трансформатора</b>	$S_{нтр}$ , кВА		$U_{нтр}$		$U_{2нтр}$	
4.	Понижающий трансформатор ТМГ-100-10(6)/0,4	100		(6,10)±2·2,5%		0,4	

\*Номинальное напряжение двигателя 360 В при номинальной частоте 47 Гц соответствует номинальному магнитному потоку двигателя

### III. Построение имитационной модели системы электроснабжения и кранового электропривода подъема с АВ

Имитационная модель для исследования динамических процессов (рис. 2) строится в пакете *Matlab/Simulink* на основании реальной системы кранового электропривода с учетом его схемы электроснабжения (рис. 1) [9-13]. Модель включает трехфазный источник синусоидального напряжения, трехфазные выключатели переменного тока, понижающий трехфазный двухобмоточный трансформатор, преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока с АИН и на входе с АВ, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для измерения параметров динамических процессов, протекающих в элементах электропривода и питающей сети, используются измерительные блоки.

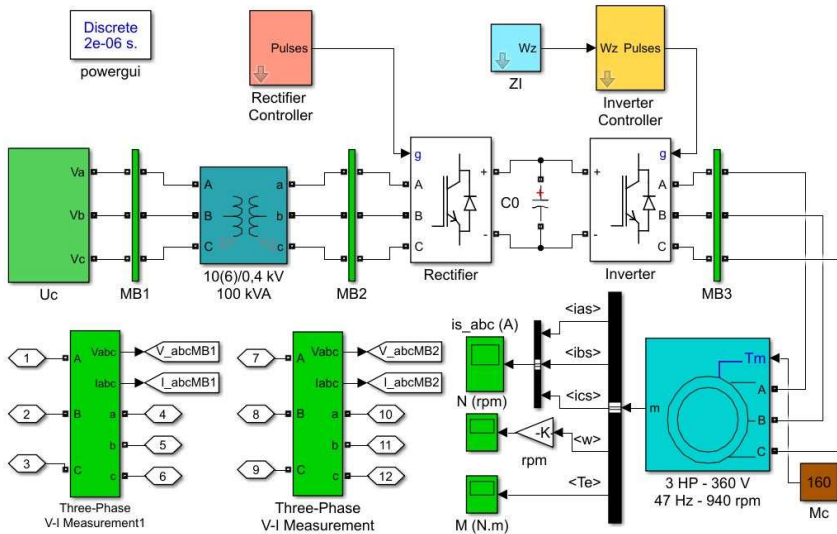


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения и электропривода подъема с АВ в *Matlab/Simulink*

Fig. 2. Simulation model of the power supply system and electric drive for lifting with a controlled active front-end in the *Matlab/Simulink*

Параметры трансформатора и электродвигателя задаются в окнах ввода параметров (рис. 3) соответствующих блоков. Система управления АВ строится по принципу векторного управления с преобразованием коор-

динат как двухконтурная система подчиненного регулирования с раздельным управлением по проекциям обобщенного вектора сетевого тока и контуром стабилизации напряжения силового фильтра в звене постоянного тока. Структурная схема управления АВ представлена на рис. 4, а. Система управления АИН электроприводом подъема реализует векторное управление и построена по принципу подчиненного регулирования с формированием каналов по составляющим потокосцепления статора и момента. Для всех контуров регулирования приняты ПИ-регуляторы с настройкой на модульный оптимум, ПИ-регулятор скорости настроен на симметричный оптимум (рис. 4, б).

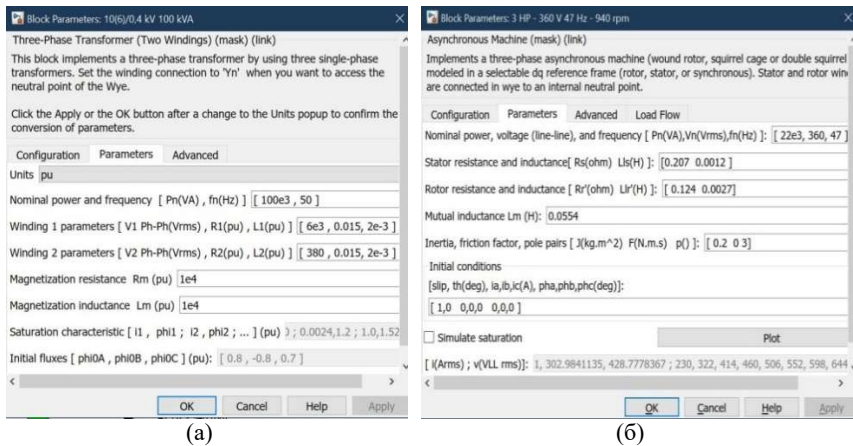


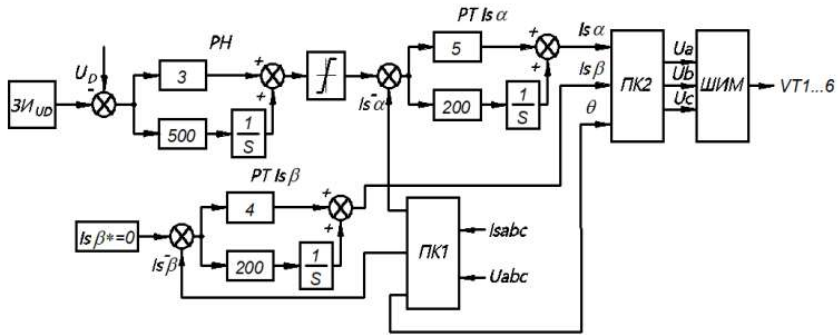
Рис. 3. Окна ввода параметров блоков:  
трансформатора (а); двигателя «Asynchronous Machine» (б)

Fig. 3. Block parameters input windows:  
transformer (a); engine «Asynchronous Machine» (b)

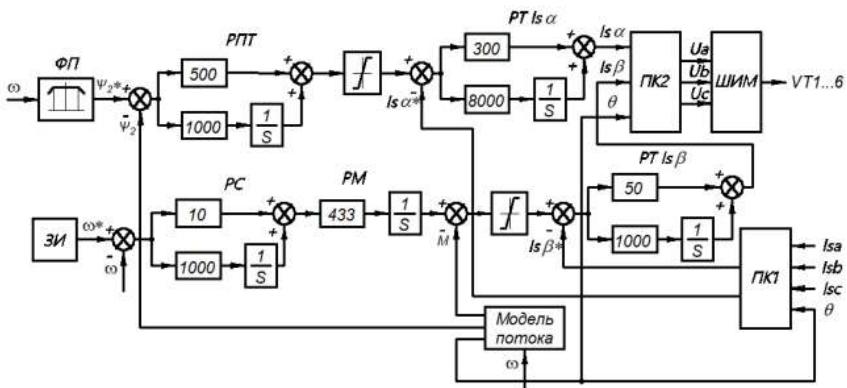
В структурной схеме систем управления АВ и АИН (рис. 4) используются следующие элементы:  $ZI_{UD}$  – датчик напряжения звена постоянного тока;  $PH$  – регулятор напряжения;  $PT\ I_s\alpha$ ,  $PT\ I_s\beta$  – регуляторы тока во вращающейся системе координат  $\alpha$ - $\beta$  (для обеих схем);  $ПК1$ ,  $ПК2$  – прямой и обратный преобразователи координат (для обеих схем); ШИМ – широтно-импульсный модулятор (для обеих схем); ФП – формирователь потока;  $ZI$  – датчик интенсивности;  $РПТ$ ,  $РС$ ,  $РМ$  – регуляторы потока, скорости и момента.

#### IV. Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения и электропривода подъема с АВ

На рис. 5 представлены результаты моделирования процесса разгона двигателя до установившейся скорости. С этой целью через задатчик интенсивности задается необходимая скорость вращения. При этом время пуска двигателя составляет 0,6 с. Двигатель нагружен постоянным моментом статических сопротивлений  $M_c = 0,7 \cdot M_n = 160 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .



(a)



(б)

Рис. 4. Структурные схемы систем управления: активным выпрямителем (а); автономным инвертором напряжения (б)

Fig. 4. Block diagrams of control systems: active rectifier (a); autonomous voltage inverter (b)



Как следует из рис. 5, напряжение в промежуточном звене постоянного тока составляет  $U_{DC} = 520$  В, что несколько выше, чем напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя; время переходного процесса в электродвигателе составляет  $t_{\text{пн}} = 0,63$  с; ток статора в процессе пуска не превышает трехкратного значения установившегося тока, который поддерживается на уровне  $I_s = 80$  А; перерегулирование по скорости в момент пуска составляет  $\sigma = 11$  %, что соответствует настройке регулятора скорости на симметричный оптимум; установившаяся скорость вращения достигает отметки  $n = 912$  об/мин, что почти соответствует номинальной скорости АД, отклонение при этом составляет  $\delta = 0,002$  %; колебание момента при пуске не превышает максимально допустимого момента и составляет  $M = 230$  Н·м; значение момента на валу двигателя  $M = 160$  Н·м соответствует заданному моменту нагрузки  $M_c = 160$  Н·м.

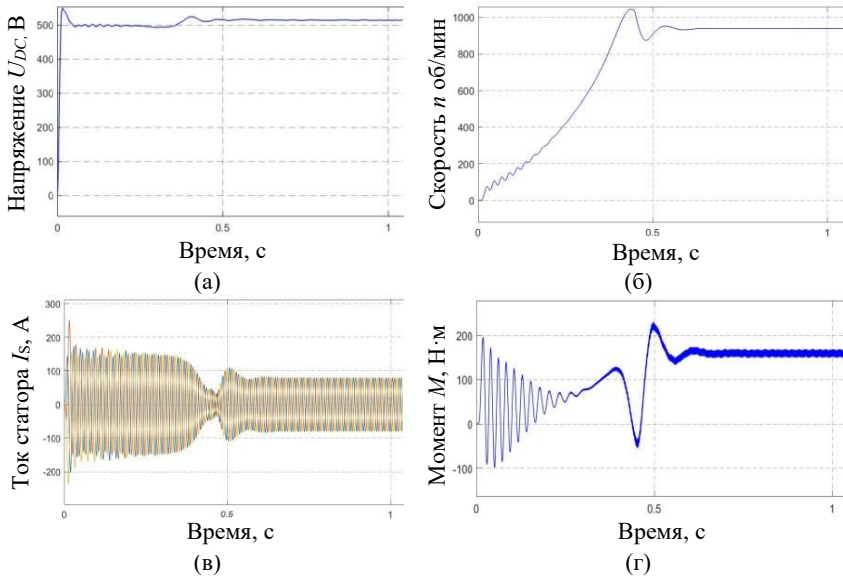


Рис. 5. Динамические характеристики электропривода: напряжение в звене постоянного тока  $U_{DC}$ , В (а); ток статора  $I_s$ , А (б); скорость  $n$ , об/мин (в); момент  $M$  двигателя, Н·м (г)

Fig. 5. Dynamic characteristics of the drive: DC link voltage  $U_{DC}$ , V (a); stator current  $I_s$ , A (b); speed  $n$ , rpm (в); torque  $M$  of the engine, N·m (г)

На рис. 6 показаны напряжения и токи на входе АВ. Для наглядности результатов представлен диапазон значений от 0,1 до 0,145 с. Угол сдвига фаз между измеренными значениями напряжения и тока на входе АВ практически равен нулю, что говорит о том, что коэффициент мощности со стороны питающей сети примерно равен единице.

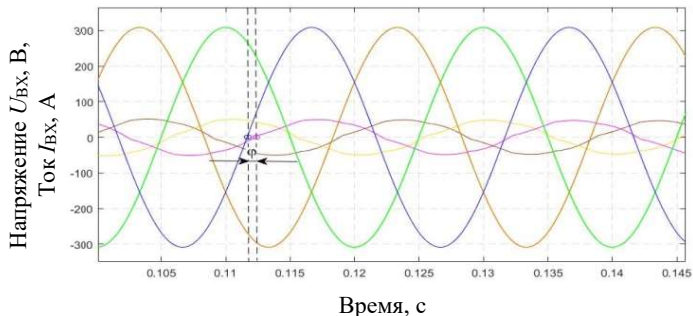


Рис. 6. Кривые напряжения и тока на входе АВ

Fig. 6. Voltage and current curves at the active front-end input

#### IV. Заключение

Результаты имитационного моделирования режимов кранового частотного электропривода подъема с заменой на входе НВ на АВ показали эффективность использования АВ. Это подтверждается следующими фактами:

- поддержание значения напряжения в звене постоянного тока большим, чем на выходе НВ, без дополнительных устройств, что повышает энергоэффективность кранового электропривода подъема;
- возможность получения значения коэффициента мощности со стороны питающей сети  $\cos\varphi \approx 1$ , что означает снижение потребления реактивной мощности и уменьшение потерь электроэнергии в сети.

© Авербух М.А., 2021

© Кузнецова А.Д., 2021

Поступила в редакцию 25.02.2021

Received 25.02.2021

#### Библиографический список

- [1] Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- [2] Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

- [3] Авербух М.А., Лимаров Д.С. Обеспечение электромагнитной совместимости крановых частотных электроприводов с электрическими сетями промышленных предприятий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 185с.
- [4] Попков О.З. Основы преобразовательной техники. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.
- [5] Авербух М.А., Коржов Д.Н., Лимаров Д.С. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ-465 // Промышленная энергетика. 2015. № 1. С. 48-53.
- [6] Chen H., Xuan B., Yang P., Chen H. A new overhead crane emergency braking method with theoretical analysis and experimental verification // *Nonlinear Dynamics*. 2019. вып. 98 (3). С. 2211-2225. DOI: 10.1007/s11071-019-05318-6.
- [7] Kessal A. Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC: дис. докт. техн. наук, Universite Ferhat Abbes-Setif, Сетиф, Алжир, 2012. – 134 с (на французском).
- [8] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [9] Нго С.К., До Н.И., Зыонг Х.А. Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014. № 3. С. 221-228.
- [10] Авербух М.А., Жуков Н.А., Прокопишин Д.И. Разработка аппаратной части активного фильтрокомпенсирующего устройства // *Интеллектуальная электротехника*. 2019. № 1. С. 105-113. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_1\_105.
- [11] Patel V., KGiri V. Field oriented control of PMSM drive using SVPWM. // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. 2014. Т. 2. Вып. 3. С. 246-255.
- [12] Awdaa M.A., Obed A.A., Saleh A.L. Three-phase induction motor SVPWM-FOC control based on PLC Matlab translation approach // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 745. № 012028. С. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- [13] Merai M., Naouar M.W., Slama-Belkhouja I., Monmasson E. An improved dc-link voltage control for a three-phase PWM rectifier using an adaptive PI controller combined with load current estimation // *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Сентябрь 11-14, 2017, Варшава, Польша. С. 1-10. DOI: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099219.

### References

- [1] B.I. Firago and L.B. Pavlyachik, *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka [Variable AC Drives]*. Minsk: Techno Perspective, 2006 (in Russian).
- [2] V.I. Klyuchev, *Teoriya elektroprivoda [Electric drive theory]*. Moscow: Energoatomizdat, 2001 (in Russian).
- [3] M.A. Averbukh and D.S. Limarov, *Obespechenie elektromagnitnoj sovmestimosti kranovykh chastotnykh elektroprivodov s elektricheskimi setyami promyshlennykh predpriyatij [Electromagnetic compatibility support for variable frequency crane drives with industrial enterprises electric grids]*. Belgorod: BSTU, 2016 (in Russian).
- [4] O.Z. Popkov “*Osnovy preobrazovatel'noj tekhniki [Fundamentals of converter equipment]*”. Moscow: MPEI, 2010. (in Russian).

- [5] M.A. Averbukh, D.N. Korzhov and D.S. Limarov, "Experimental evaluation of the level of higher harmonics in the power supply circuit of the pipe bending mill UZTM-465", *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 48-53, 2015.
- [6] H. Chen, B. Xuan, P. Yang and H. Chen, "A new overhead crane emergency braking method with theoretical analysis and experimental verification", *Nonlinear Dynamics*, vol. 4, no. 3, pp. 2211-2225, Nov. 2019. DOI: 10.1007/s11071-019-05318-6.
- [7] A. Kessal, *Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC [Correction of the power factor at the input of an AC/DC converter]*, Doctorat en Sciences thesis, Université Ferhat Abbes-Setif, Setif, Algeria, 2012 (in French).
- [8] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academy, 2006.
- [9] X.C. Ngo, N.Y. Do and H.A. Duong, "Modeling of the electric drive with frequency control of the asynchronous machine", *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 3, pp. 221-228, 2014.
- [10] M.A. Averbukh, N.A. Zhukov and D.I. Prokopishin "Development hardware part of active harmonic filter", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 105-113, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_1\_105.
- [11] V. Patel and V. KGiri, "Field oriented control of PMSM drive using SVPWM", *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 246-255, 2014.
- [12] M.A. Awdaa, A.A. Obed and A.L. Saleh, "Three-phase induction motor SVPWM-FOC control based on PLC Matlab translation approach", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 745, no. 012028, pp. 1-8, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- [13] M. Merai, M.W. Naouar, I. Slama-Belkhdja and E. Monmasson, "An improved dc-link voltage control for a three-phase PWM rectifier using an adaptive PI controller combined with load current estimation", in proc. *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Sept. 11-14, 2017, Warsaw, Poland, pp. 1-10. DOI: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099219.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Авербух Михаил Александрович**, доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

**Кузнецова Альвина Дмитриевна**, аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

**Mikhail A. Averbukh**, D. Sci. (Eng.), professor of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov, Belgorod, Russian Federation.

**Alvina D. Kuznetsova**, graduate student of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov, Belgorod, Russian Federation