

УДК 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011

Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора

Дунаев Михаил Павлович, Довудов Сарфароз Умедович

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск, *mdunaev10@mail.ru*

Аннотация. В статье представлена функциональная схема системы управления электроприводом шагающего экскаватора. Разработаны структурно-параметрические модели электроприводов постоянного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления. Проведено моделирование электроприводов постоянного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления в среде Matlab/Simulink. Приведено сравнение результатов моделирования систем управления.

Ключевые слова: система управления, электропривод, моделирование

Цитирование: Дунаев М.П. Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 117-123. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011.

Введение. Производственные комплексы по добыче минерального сырья, включающие мощные шагающие экскаваторы разных типов, составляют важную часть современного промышленного оборудования производственных и транспортных систем [1]. Производительность промышленного оборудования производственных систем во многом зависит от качества управления электроприводами (ЭП) постоянного и переменного тока, являющихся основой силового электрооборудования (ЭО) шагающих экскаваторов (ШЭ) и управляемых с помощью современных полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторов и силовых полупроводниковых модулей [2-4].

В настоящее время самыми востребованными способами управления ЭО ШЭ по праву можно считать способы управления с применением систем импульсно-фазового управления (СИФУ) и широтно-импульсного управления (ШИУ), которые могут обеспечить необходимые параметры управления ЭО ШЭ [5-8].

Тем не менее у способа управления с СИФУ можно отметить ряд недостатков, касающихся его эффективности: сравнительно низкое быстродействие системы управления, сравнительно низкий коэффициент мощности, значительные искажения формы напряжения питающей сети [9]. Способ ШИУ также имеет ряд недостатков, а именно: сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя и значительные потери мощности при включении и выключении полупроводниковых ключей управляемого силового преобразователя [10-18].

Повышению эффективности промышленного оборудования шагающих экскаваторов может способствовать применение частотно-импульсного управления (ЧИУ) [19].

Однако следует отметить, что этот способ управления ЭО ШЭ до сих пор полностью не изучен.

Моделирование электропривода шагающего экскаватора. На рис.1 приведена разработанная функциональная схема ЭП подъема ковша ШЭ постоянного тока, где БЗС – блок задания угловой скорости, РН – регулятор напряжения, РТ – регулятор тока, БТО – блок токоограничения, ВГ – возбудитель генератора, Г – генератор постоянного тока, Д – два двигателя постоянного тока, МП – механизм подъема ковша, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения. В качестве ВГ может выступать тиристорный преобразователь (ТПВГ) или импульсный преобразователь (ИПВГ).

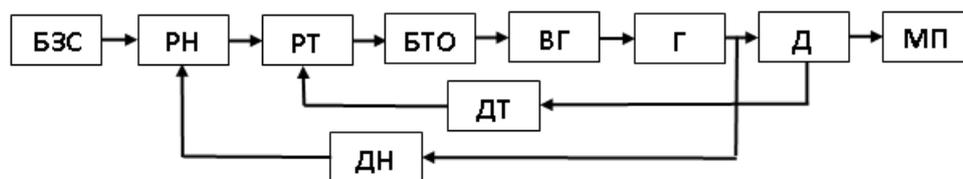


Рис. 1. Функциональная схема ЭП подъема ШЭ постоянного тока

Для получения максимальной производительности работы ШЭ требуется оптимизировать настройки системы управления ЭП. Система управления настраивается на модульный оптимум (МО) отдельно по контурам регулирования тока и напряжения. Настройка на МО обеспечивает необходимую компенсацию большой постоянной времени в контуре регулирования и позволяет получить следующие характеристики переходного процесса: статическая ошибка $\delta < 10\%$; время переходного процесса при пуске $t_{пп} = 4,7 T_{\mu}$, где T_{μ} - суммарная малая некомпенсируемая постоянная времени контура; максимальное перерегулирования $\sigma_{\max} < 4,3\%$.

Структурная схема контура регулирования тока показана на рис. 2, где $U_{зг}$ – сигнал задания тока, $K_{ТПВГ}$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя возбуждения генератора, $T_{ТПВГ}$ – постоянная времени СИФУ тиристорного преобразователя возбуждения генератора, $K_{Г}$ – коэффициент усиления генератора, T_1 – постоянная времени обмотки возбуждения генератора, T_2 – постоянная времени обмотки якоря генератора, $T_{яц}$ – постоянная времени якорной цепи двигателя, $K_{от}$ – коэффициент обратной связи по току, $K_{дт}$ – коэффициент датчика тока.

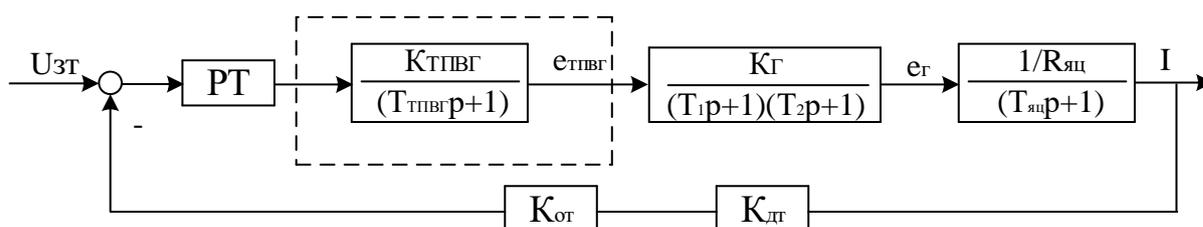


Рис. 2. Структурная схема контура тока

Коэффициент усиления РТ будет равен:

$$K_{РТ} = \frac{T_1 \cdot R_{яц}}{K_{ТПВГ} \cdot K_{Г} \cdot K_{Т} \cdot \alpha_{Т} \cdot T_{\mu Г}} \cdot \left(1 + \left(\frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $T_{\mu Г}$ – суммарная малая постоянная времени контура тока.

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока будет иметь вид:

$$W(p)_{Т.ЗАМ} = \frac{\frac{1}{K_{ТО}} \cdot \frac{1 + \left(\frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2}}{\frac{2 \cdot T_{\mu Г}^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)^2} \cdot p^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu Г}^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu Г}}{T_1} \right)} \cdot p + 1}. \quad (2)$$

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока имеет вид:

$$W(p)_{T.3AM} = \frac{1}{K_T \cdot (2 \cdot T_{\mu TЭ}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu TЭ} \cdot p + 1)} \quad (3)$$

Оптимизация контура напряжения также проводится на МО. Этот контур включает в себя оптимизированный замкнутый контур тока.

Передаточная функция замкнутого оптимизированного контура напряжения имеет вид:

$$W(p)_{H.3AM} = \frac{1}{K_H \cdot 2 \cdot C \cdot (2 \cdot T_{\mu H}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu H} \cdot p + 1)}, \quad (4)$$

где $T_{\mu H}$ – суммарная малая постоянная времени контура напряжения, C – постоянная двигателя.

Структурно-параметрическая модель ЭП подъема ШЭ с СИФУ представлена на рис. 3, а переходные процессы показаны на рис. 4.

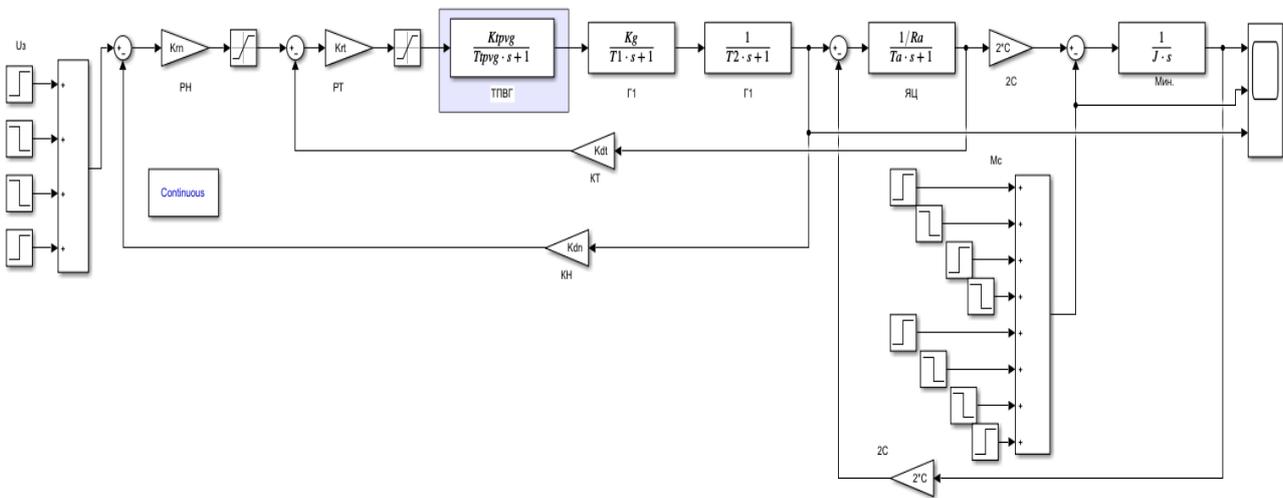


Рис. 3. Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с СИФУ

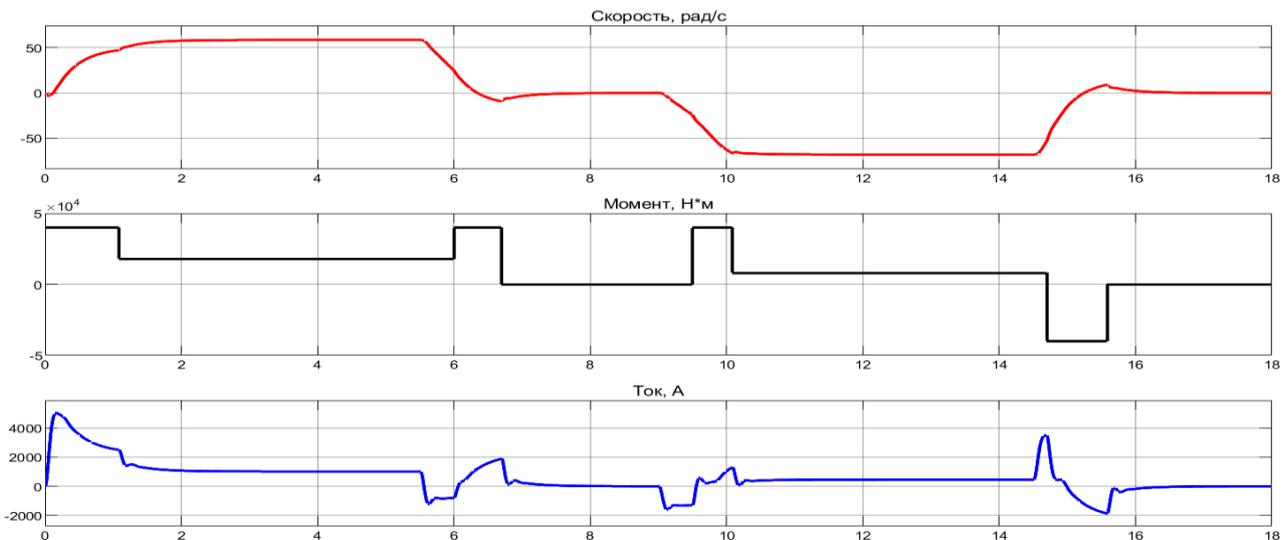


Рис. 4. Переходные процессы в ЭП ШЭ с СИФУ по угловой скорости, моменту и току

После настройки системы управления на МО и компенсации больших постоянных времени быстроедействие системы ЭП определяется оставшимися некомпенсированными малыми постоянными времени T_{μ} .

Как известно, у способа управления с СИФУ, реализованного в блоке ТПВГ (рис.3), наблюдается сравнительно низкое быстроедействие системы управления, обусловленное величиной постоянной времени СИФУ тиристорного преобразователя возбуждения генератора $T_{ТПВГ} = 0,00167$ с.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать способ ЧИУ, имеющий значительно меньшую постоянную времени в системе управления $T_{ИПВГ} = 0,0005$ с.

Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с ЧИУ (блок ИПВГ), реализованная в среде Matlab/Simulink и настроенная на модульный оптимум, представлена на рис. 5, а переходные процессы показаны на рис. 6.

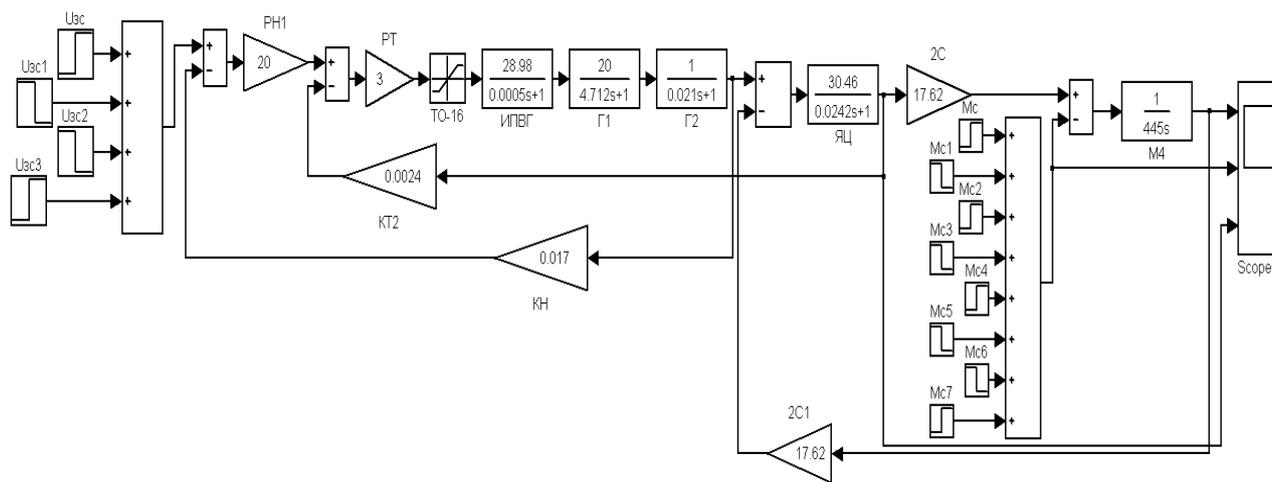


Рис. 5. Структурно-параметрическая модель ЭП ШЭ с ЧИУ

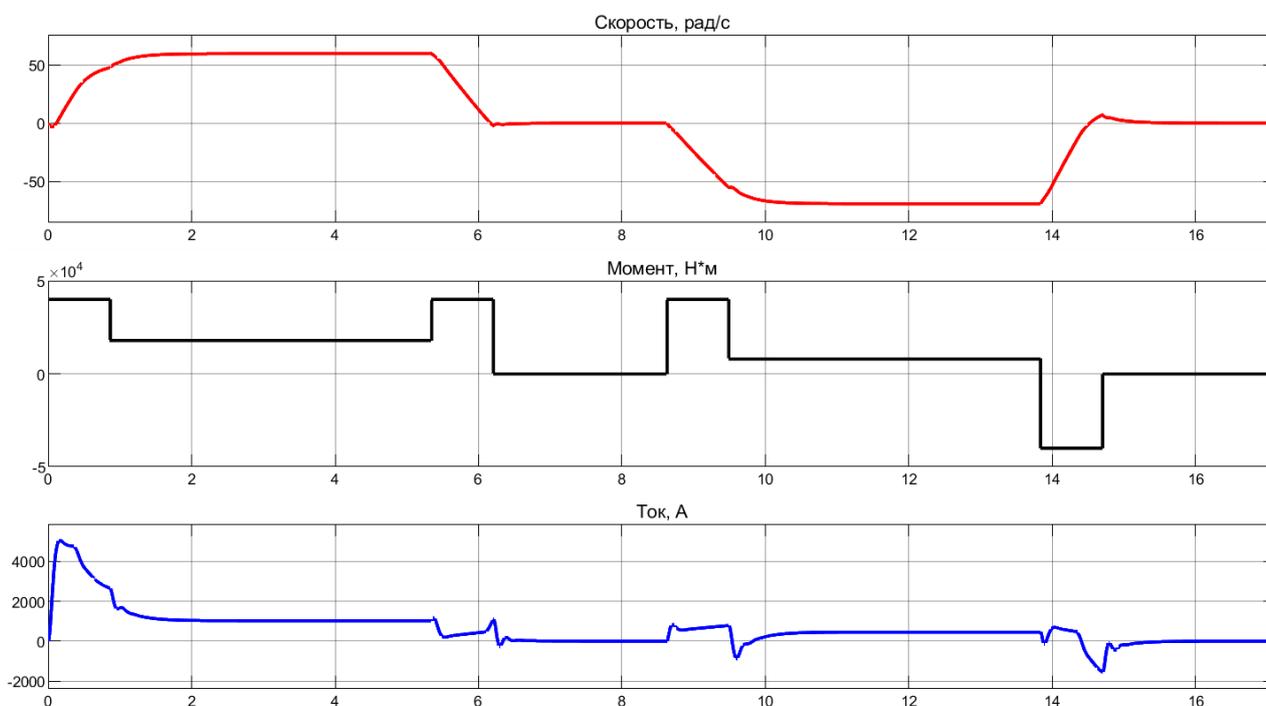


Рис. 6. Переходные процессы в ЭП ШЭ с ЧИУ по угловой скорости, моменту и току

Сравнение результатов моделирования угловой скорости ЭП ШЭ с СИФУ и ЧИУ представлено на рис. 7.

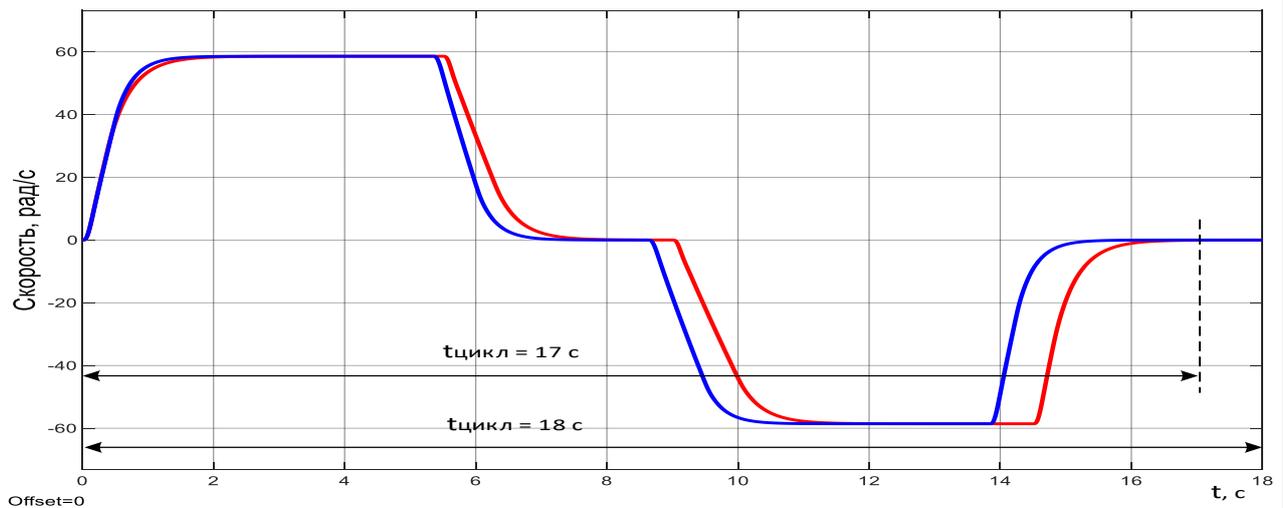


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования ЭП ШЭ с СИФУ (1) и ЧИУ (2)

Как видно из рис.7, за счет ускорения динамических процессов в ЭП ШЭ способ ЧИУ обеспечивает сокращение цикла работы ШЭ на 1 с, что увеличивает производительность работы ШЭ на 5 %.

Заключение. Проанализировано современное состояние разработок в области ЭП ШЭ и предложен способ повышения производительности ШЭ. Разработаны функциональная и структурно-параметрические модели ЭП ШЭ, позволяющие определять динамические характеристики ЭО ШЭ. Реализованы модели ЭП ШЭ с СИФУ и ЧИУ в среде Matlab/Simulink. Показано, что использование способа ЧИУ позволит на 5 % увеличить производительность ШЭ.

Список источников

1. Кругликов О.В. Разработка, производство и применение энергоэффективных электрических машин и приводов / О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров, С.В. Пискунов // *Электротехника*, 2015. – № 3. – С. 4-8.
2. Жемеров Г.Г. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей / Г.Г. Жемеров, В.В. Ивахно, О.И. Ковальчук // *Электротехника и электромеханика*, 2011. – № 4. – С. 21-28.
3. Дунаев М.П. Моделирование электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // *Междунар. научно-практическая конференция «Энергетика региона: состояние и перспективы развития»: труды.* - Душанбе: Изд-во ТТУ, 2019. – С.101-106.
4. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи / С.Г. Герман-Галкин. – Л.: Энергия, 1979. – 96 с.
5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th international conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp. 768-773.
6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using matlab/simulink subsystem. *electrical, control and communication engineering*, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
7. Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordiienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho universytetu*, 2020, no. (2), pp 82-88.
8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tiyu Kang. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. *Energy Procedia*, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102.
9. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами / М.П. Дунаев. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 103 с.
10. Bai Baodong, Chen Dezhi. Inverter IGBT loss analysis and calculation, 2013 IEEE International conference on industrial technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI:10.1109/ICIT.2013.6505733.

11. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J., Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European conference on power electronics and applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
12. Дунаев М.П. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Всерос. научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири»: труды. – № 1. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – С. 3-6.
13. Shahin A., Payman A., Martin J., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. “Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter,” IECON 2010 - 36th Annual conference on IEEE industrial electronics society, Glendale, AZ, 2010, pp. 373-378.
14. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. Electronics and electrical engineering, 2011, no. 7(113), pp. 9-14, ISSN 1392 – 1215.
15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International Conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.
16. Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Вестник ИрГТУ, 2020. – № 2. – С. 345-355.
17. Shirahama H., Muto T. A Novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
18. Zhu Y., Xiao M., Su X. et al. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied Sciences, 2020, no. 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539.
19. Дунаев М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении., 2020. – № 2. – С.134-143.

Дунаев Михаил Павлович. Доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. AuthorID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Довудов Сарфароз Умедович. ассистент Иркутского национального исследовательского технического университета. ORCID: 0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.011

Simulation of the electric drive control system of a walking excavator

Mikhail P. Dunaev, Sarfaroz U. Dovudov

National Research Irkutsk State Technical University,

Russia, Irkutsk, *mdunaev10@mail.ru*

Abstract. The article presents a functional diagram of the control system of the electric drive of a walking excavator. Structural-parametric models of DC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system have been developed. Simulation of DC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system in the Matlab/Simulink environment was carried out. A comparison of the results of modeling control systems is given.

Keywords: control system, electric drive, simulation

References

1. Kruglikov O.V., Makarov L.N., Piskunov S.V. Razrabotka, proizvodstvo i primeneniye energoeffektivnykh elektricheskikh mashin i privodov [Development, production and application of energy efficient electrical machines and drives], Elektrotehnika [Electrical Engineering], 2015, no. 3, pp. 4-8.
2. G.G. Zhemerov, V.V. Ivakhno, O.I. Koval'chuk. Raschetmoshchnosti poter' i temperatury struktury tranzistorno-diodnykh moduley pri komp'yuternom modelirovanii preobrazovateley [Calculation of power losses and temperature of the structure of transistor-diode modules in computer modeling of converters] Elektrotehnika i

- elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics], 2011, no. 4, pp. 21-28, ISSN 2074-272X.
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy shirotno-impul'snogo preobrazovatelya [Modeling a pulse-width converter circuit]. In: Povysheniye effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyakh Sibiri: Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Improving efficiency of electric energy production and use in the conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22-26 April 2019, Irkutsk], Irkutsk, Irkutsk National Research Technical university, 2019, vol. 1, pp. 3-6.
 4. German-Galkin S.G. Shirotno-impul'snyye preobrazovateli [Pulse-width converters]. L.: Energy, 1979, 96 p.
 5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th International Conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp 768-773, DOI: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
 6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using matlab/simulink subsystem. Electrical, control and communication engineering, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
 7. Plakhtii O.A., Nerubatskiy V.P., Hordiienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020, no. (2), pp 82-88.
 8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tieyu Kang. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. Energy Procedia, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102.
 9. Dunaev M.P. Rezonansnyye inventory dlya upravleniya elektroprivodami [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk, IrGTU [Irkutsk State Technical University], 2004, 103 p.
 10. Bai Baodong, Chen Dezhi. Inverter IGBT loss analysis and calculation, 2013 IEEE International Conference on industrial technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505733.
 11. Feix G., Dieckerhoff, S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
 12. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy chastotno-impul'snogo preobrazovatelya [Simulation of the frequency-pulse converter circuit]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15), pp. 144-152.
 13. Shahin A., Payman A., Martin J., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter, IECON 2010 - 36th Annual conference on IEEE industrial electronics society, Glendale, AZ, 2010, pp. 373-378.
 14. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. Electronics and electrical engineering, 2011, no. 7(113), pp. 9-14, ISSN 1392 – 1215.
 15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International Conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.
 16. Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters]. Vestnik IrGTU [ISTU bulletin], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355.
 17. Shirahama H., Muto T. A Novel Power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
 18. Zhu Y., Xiao M., Su X. [et al.] Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied Sciences, 2020, no. 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539.
 19. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye odnofaznogo dvukhurovneвого avtonomnogo invertora napryazheniya s chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2 (18), pp. 134-143.

Dunaev Mikhail Pavlovich. Doctor of technical sciences, professor, Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Dovudov Sarfaroz Umedovich. Assistant, Irkutsk National Research Technical University. ORCID: 0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 06/08/2023; approved after reviewing 08/21/2023; accepted for publication 09/18/2023.