

УДК 62-83-52

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТИПА УПРАВЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА НА ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

**И. В. ДОРОЩЕНКО, М. Н. ПОГУЛЯЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*С использованием функциональных схем и имитационных моделей асинхронно-вентильного каскада произведен расчет и анализ действующих значений токов статора, токов ротора и электромагнитного момента электроприводов на основе асинхронно-вентильного каскада с транзисторным и тиристорным управляемыми преобразователями в роторной цепи. Представлен гармонический спектр электромагнитного момента асинхронно-вентильного каскада с различными типами преобразователей.*

**Ключевые слова:** асинхронно-вентильный каскад, асинхронный двигатель с фазным ротором, электромагнитный момент, имитационная модель, компьютерное моделирование, моделирование электропривода.

## ASSESSMENT OF INFLUENCE OF ASYNCHRONOUS VALVE CASCADE CONTROLLED CONVERTER TYPE ON ELECTROMAGNETIC TORQUE PULPATIONS

**I. V. DOROSCHENKO, M. N. POGULIAEV**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*The calculation and analysis have been performed to find out the effective values of stator currents, rotor currents and electromagnetic torque of electric drives based on an asynchronous valve cascade with transistor and thyristor controlled converters in the rotor circuit. It has been done using functional diagrams and simulation models of an asynchronous valve cascade. The harmonic spectrum of the electromagnetic torque of an asynchronous valve cascade with various types of converters is presented.*

**Keywords:** asynchronous valve cascade, asynchronous motor with wound rotor, electromagnetic torque, simulation model, computer modeling, electric drive modeling.

### **Введение**

Корректный выбор электродвигателя является основным аспектом для обеспечения надежной и безотказной работы любой системы электропривода. Это объясняется тем, что выход электродвигателей из строя приводит к нарушению взаимосвязанных технологических циклов, полной или частичной остановке производственного оборудования и механизмов. При выборе электродвигателя необходимо руководствоваться особенностями работы разрабатываемой системы электропривода. Особое внимание следует уделять потерям мощности при нагреве вследствие искажения формы токов, характерных для систем электропривода с полупроводниковыми управляемыми преобразователями (УП). Для схемы асинхронно-вентильного каскада (АВК) искажение формы токов статора и ротора приводит к недоиспользованию асинхронной машины как по моменту, так и по мощности [1–4]. Кроме того, искажения формы токов статора и ротора АВК, вызванные работой входящих в состав

управляемых преобразователей, оказывают существенное влияние на пульсации электромагнитного момента данной системы электропривода. Такие пульсации вызывают появление механических вибраций, ускоряющих механическое старение узлов электродвигателей. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на выявление факторов, приводящих к появлению повышенных пульсаций электромагнитного момента в различных системах электроприводов.

Цель настоящей работы – изучение влияния типа управляемого преобразователя в роторной цепи АВК на пульсации электромагнитного момента асинхронного двигателя и установление возможных негативных последствий от колебаний электромагнитного момента.

### Основная часть

Исследование влияния типа управляемого преобразователя в роторной цепи АВК на пульсации электромагнитного момента асинхронного двигателя будем проводить методом компьютерного моделирования в программной среде Matlab.

На основании функциональных схем АВК с тиристорным и транзисторным управляемыми преобразователями (автономным инвертором напряжения на основе IGBT-модулей с широтно-импульсной модуляцией) в цепи ротора (рис. 1) в среде MatlabSimulink были составлены имитационные модели данных схемных решений АВК на базе асинхронного электродвигателя с фазным ротором 4МТФ112L6. При моделировании асинхронной машины с фазным ротором использовалась имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором, представленная в [5–7], как наиболее подходящая для машин двойного питания и схем АВК. В имитационной модели транзисторного инвертора использовалась трехфазная двухполярная ШИМ с двухсторонней модуляцией.

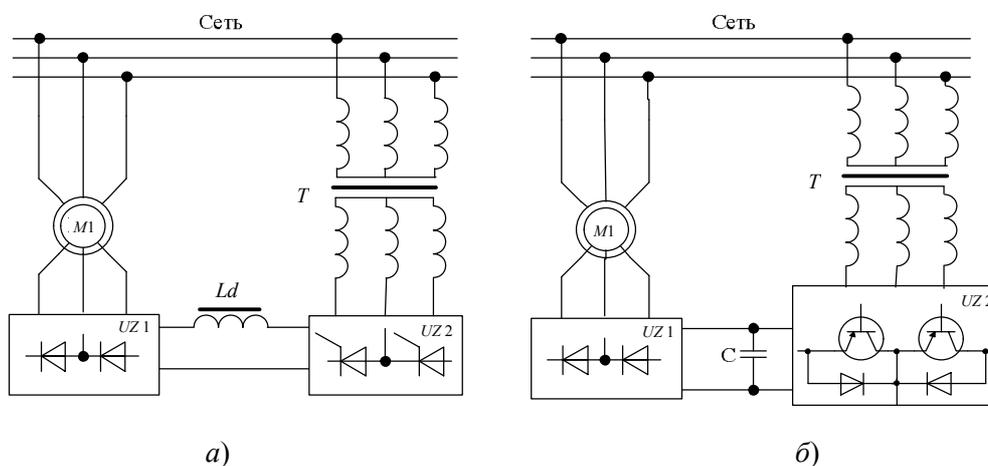


Рис. 1. Функциональная схема асинхронно-вентильного каскада:  
 а – с тиристорным управляемым преобразователем;  
 б – с транзисторным управляемым преобразователем

Для выявления особенностей работы представленных схем асинхронно-вентильных каскадов осуществлялось их имитационное моделирование для двигательного режима работы при номинальной нагрузке  $M_n$  и нагрузке, равной половине номинальной  $0,5 M_n$ , в диапазоне регулирования скорости вращения от  $\omega_n$  до  $0,4\omega_n$ . Такие режимы наиболее характерны при работе АВК во многих технологических процессах. В процессе моделирования были рассчитаны значения токов статора, ротора и электромагнитного момента, а также получены их временные диаграммы.

На рис. 2 показаны временные диаграммы токов статора  $I_s$ , токов ротора  $I_r$  и электромагнитного момента  $M$  в статическом режиме для АВК с транзисторным (рис. 2, а, в) и с тиристорным УП в роторной цепи (рис. 2, б, г) при скорости вращения  $\omega = 0,4\omega_n$ . Диаграммы получены при номинальной нагрузке  $M_n$  и нагрузке, равной половине номинальной  $0,5M_n$  асинхронного двигателя с фазным ротором.

На рис. 3 приведены диаграммы токов статора  $I_s$ , токов ротора  $I_r$  и электромагнитного момента при номинальной скорости вращения ротора. Диаграммы, представленные на рис. 3, а, б, смоделированы для момента нагрузки АВК, равного половине номинального момента асинхронного двигателя  $M = 0,5M_n$ . Диаграммы, данные на рис. 3, в, г, получены для момента нагрузки АВК, равного номинальному моменту двигателя  $M = M_n = 51 \text{ Нм}$ .

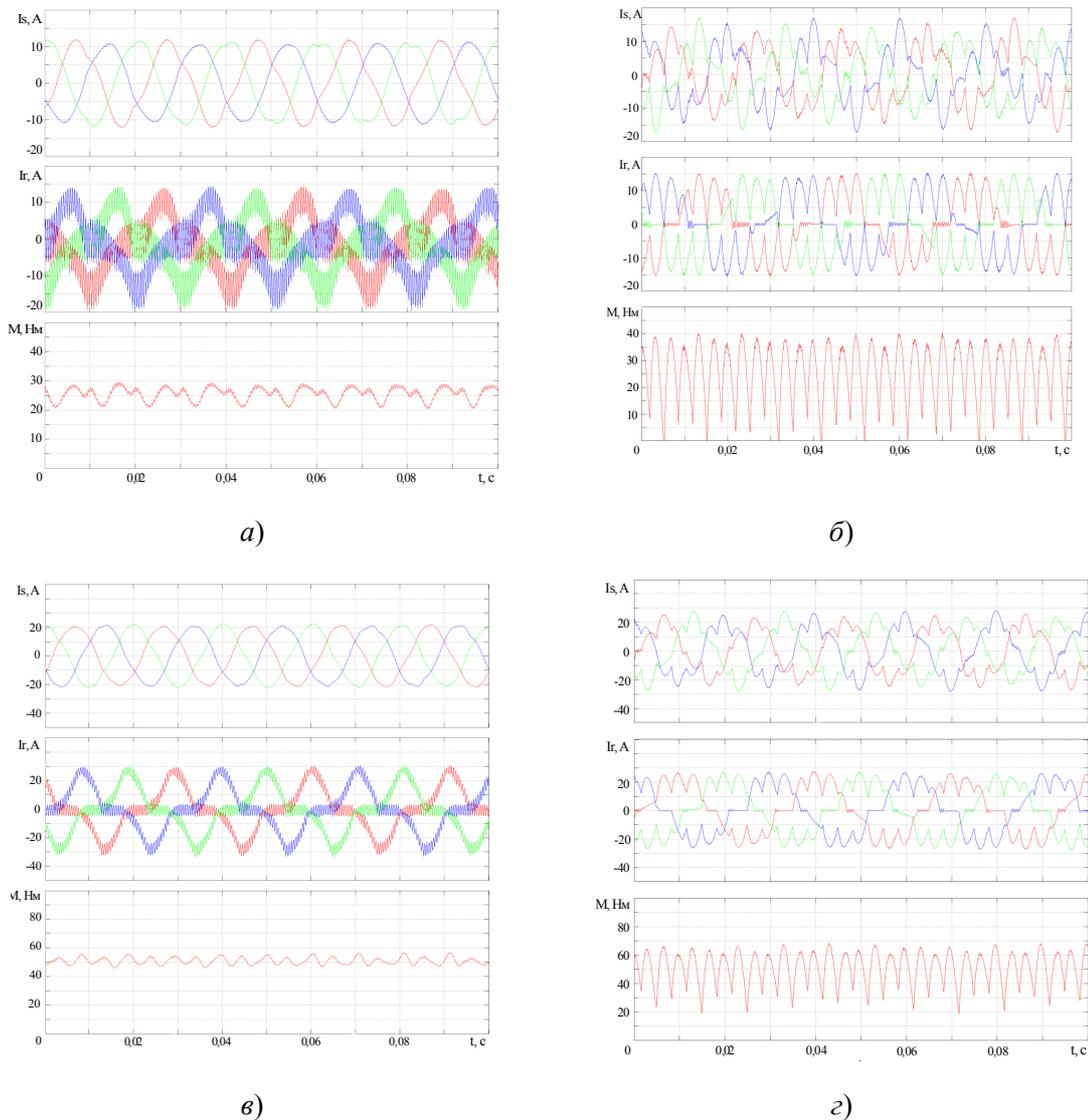


Рис. 2. Диаграммы токов и электромагнитного момента асинхронно-вентильного каскада при  $\omega = 0,4\omega_n$ :

а – с транзисторным управляемым преобразователем ( $M = 0,5M_n$ );

б – с тиристорным управляемым преобразователем ( $M = 0,5M_n$ );

в – с транзисторным управляемым преобразователем ( $M = M_n$ );

г – с тиристорным управляемым преобразователем ( $M = M_n$ )

Из рис. 2 и 3 видно, что пульсации электромагнитного момента рассматриваемых вариантов схем АВК при различных скоростях вращения в диапазоне АВК от  $\omega_n$  до  $0,40\omega_n$  и моментах нагрузки от  $0,5 M_n$  до номинального значения  $M_n$  существенно различаются. Так, в схеме с тиристорным преобразователем в зависимости от скорости вращения ротора и нагрузки на валу электродвигателя размах пульсаций электромагнитного момента варьируется в диапазоне 35–45 Нм. В то же время в схеме с транзисторным преобразователем размах пульсаций электромагнитного момента – примерно в 5 раз меньше и составляет 7–10 Нм.

Для удобства проведения сравнительного анализа также была осуществлена оценка гармонического состава возникающих пульсаций электромагнитного момента. С этой целью получены их гармонические спектры для крайних значений рассматриваемого диапазона скорости вращения и нагрузок (рис. 4).

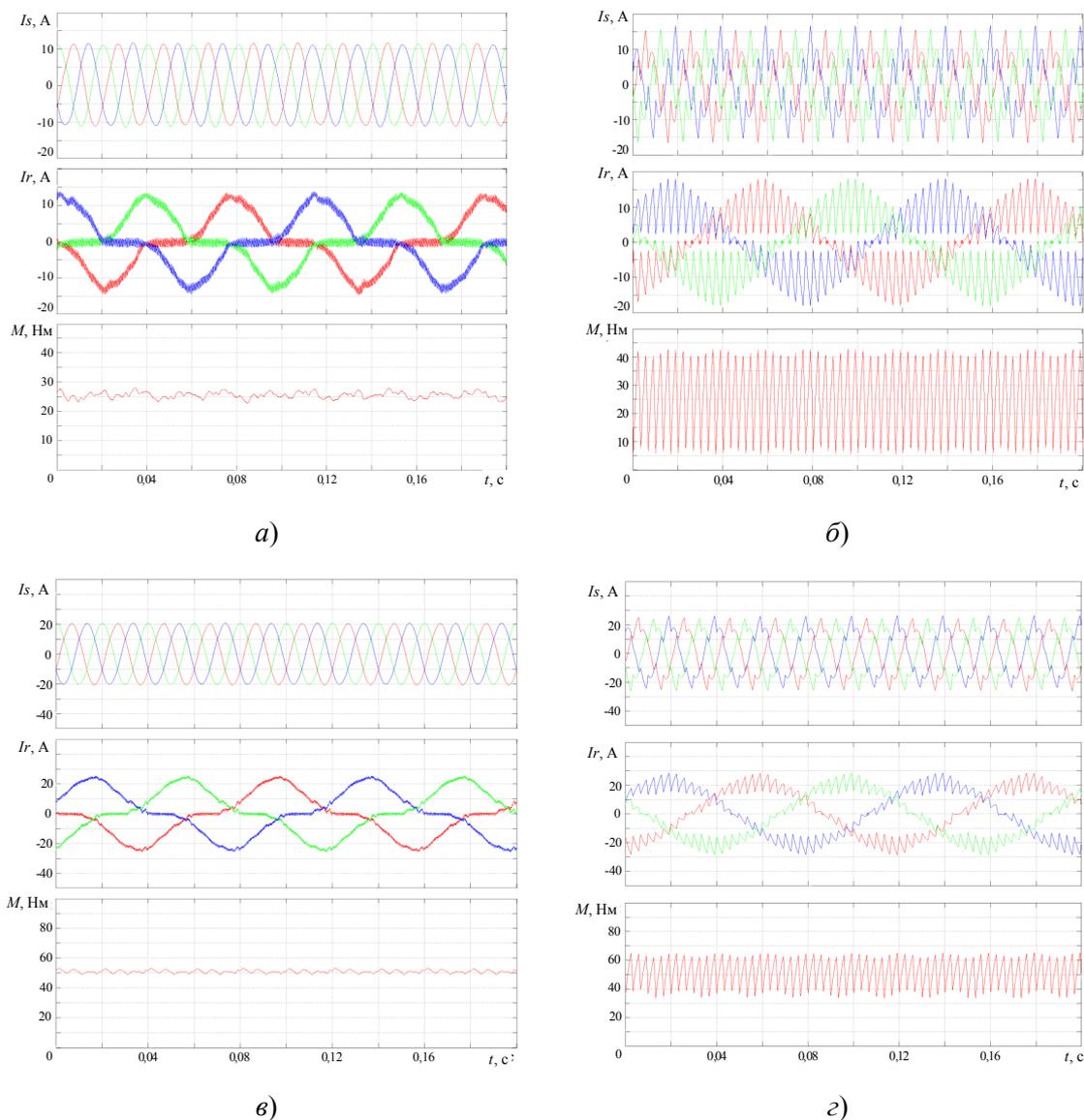


Рис. 3. Диаграммы токов и электромагнитного момента асинхронно-вентильного каскада при  $\omega = \omega_n$ :

а – с транзисторным управляемым преобразователем ( $M = 0,5 M_n$ );

б – с тиристорным управляемым преобразователем ( $M = 0,5 M_n$ );

в – с транзисторным управляемым преобразователем ( $M = M_n$ );

г – с тиристорным управляемым преобразователем ( $M = M_n$ )

Из спектрограмм следует, что коэффициент нелинейных искажений  $k_n$  (THD) в схеме АВК с тиристорным преобразователем существенно выше, чем в схеме с транзисторным преобразователем. В первой схеме при скорости вращения  $0,4\omega_n$  и нагрузке на валу электродвигателя, равной  $0,5M_n$ , коэффициент нелинейных искажений составляет  $k_n = 58,72\%$ , во второй схеме  $k_n = 12,85\%$ . При номинальных значениях скорости вращения и нагрузке на валу электродвигателя коэффициенты нелинейных искажений соответственно равны 22,92 и 2,67%.

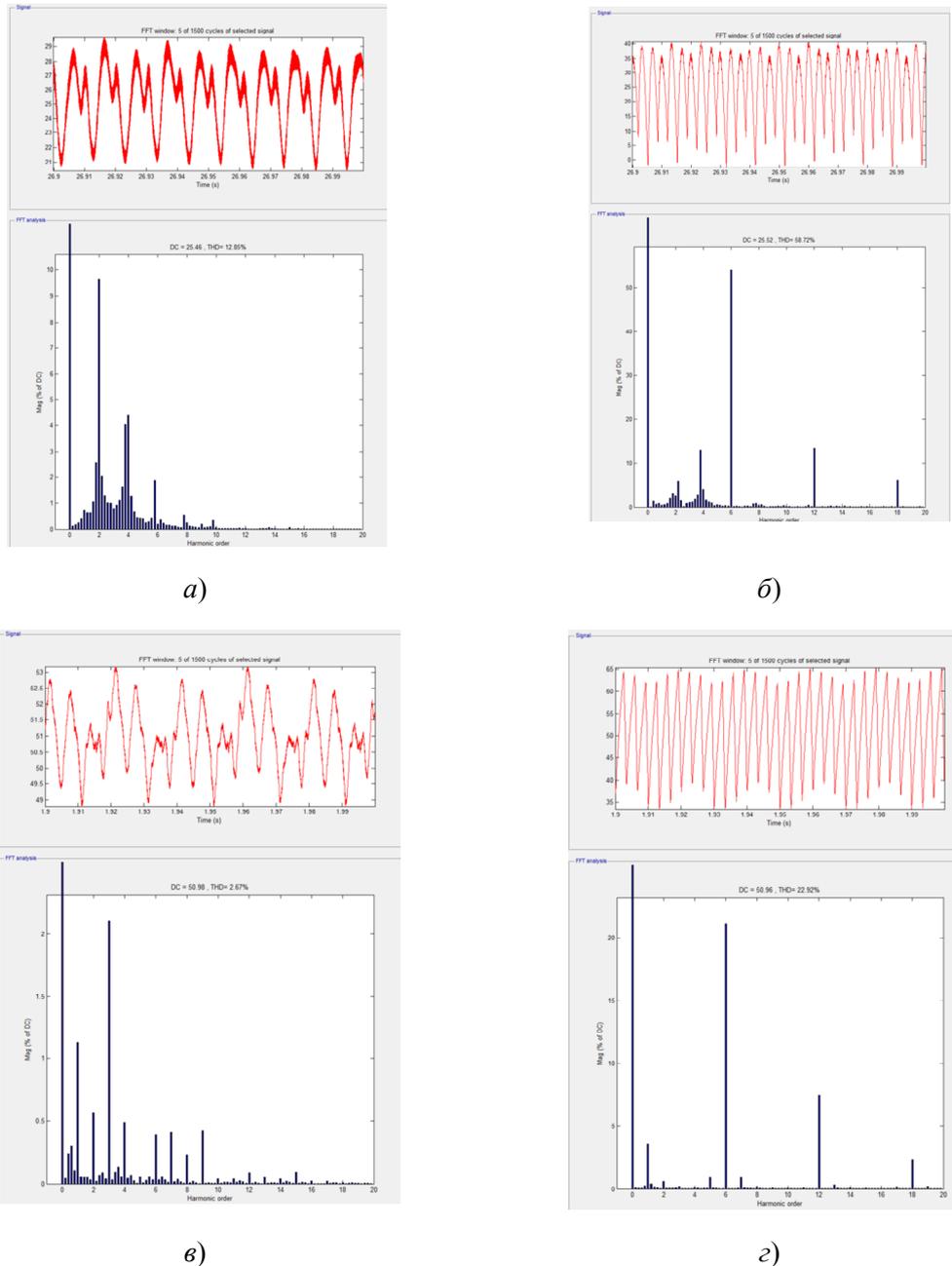


Рис. 4. Гармонические спектры электромагнитных моментов асинхронно-вентильного каскада:

а – с транзисторным управляемым преобразователем ( $\omega = 0,4 \omega_n$ ;  $M = 0,5M_n$ );

б – с тиристорным управляемым преобразователем ( $\omega = 0,4 \omega_n$ ;  $M = 0,5M_n$ );

в – с транзисторным управляемым преобразователем ( $\omega = \omega_n$ ;  $M = M_n$ );

з – с тиристорным управляемым преобразователем ( $\omega = \omega_n$ ;  $M = M_n$ )

### Заключение

Анализируя и сравнивая полученные результаты с данными ранее проведенных исследований [2–4], можно отметить, что для схемы АВК с тиристорным УП в роторной цепи искажения синусоидальности формы токов статора и ротора, обусловленные наличием высших гармоник, приводят к большим пульсациям электромагнитного момента, которые могут достигать почти 60 %. Такие пульсации момента будут создавать повышенную вибрацию, которая пагубно сказывается на подшипниках электродвигателей, способствует ускоренному износу изоляции обмотки, и в результате приводит к снижению срока службы электродвигателя [7, 8].

Для схемы АВК с транзисторным УП искажения токов статора и ротора менее существенны, и как следствие – менее значительны пульсации электромагнитного момента (не превышающие в рассматриваемых режимах работы 13 %). Таким образом, использование в цепи ротора инвертора напряжения на основе IGBT-модулей с широтно-импульсной модуляцией позволяет практически избежать появления вибраций из-за пульсаций электромагнитного момента, что будет способствовать повышению надежности и долговечности электродвигателя как наиболее ответственного звена в комплексе технологического оборудования.

Результаты данных исследований следует учитывать при проектировании, разработке и эксплуатации электроприводов, построенных по схеме АВК.

### Литература

1. Дорощенко, И. В. Исследование гармонического состава тока асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. С. Захаренко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 1 (60). – С. 51–57.
2. Дорощенко, И. В. Электромагнитная совместимость электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 14–16 окт. 2015 г. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2015. – С. 70–75.
3. Дорощенко, И. В. Механические характеристики автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 2 (45). – С. 68–72.
4. Дорощенко, И. В. Имитационная модель асинхронно-вентильного каскада в Matlab Simulink / И. В. Дорощенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2015. – С. 264–267.
5. Дорощенко, И. В. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB Simulink / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 99–106.
6. Simulation model of an asynchronous machine with wound rotor in matlab simulink / I. Doroshchenko [et al.] // SUSE-2021 : EC3 Web of Conferences, Kazan, 18–20 Feb. 2021 / Kazan Federal University. – Kazan, 2021. – Vol. 288. – P. 0110. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801110>
7. Миндрин, В. И. Виды и причины вибрации энергетических машин / В. И. Миндрин, Г. В. Пачурин, М. Н. Ребрушкин // Соврем. наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – С. 32–36.

8. Алексеева, Л. Б. Причины возникновения и методы уменьшения вибраций роторных машин / Л. Б. Алексеева, В. П. Уваров // Наука и современность. – 2012. – № 18. – С. 172–176.

### Reference

1. Doroshhenko I. V., Poguljaev M. N., Zaharenko V. S. The study teKhnicheskogo of harmonic composition of asynchronous-valve cascade current. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2015, no. 1 (60), pp. 51–57 (in Russian).
2. Doroshhenko I. V. Electromagnetic compatibility of an electromechanical test bench based on an asynchronous valve cascade. *Jelektromehaničeskie preobrazovateli jenerгии: materialy VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Tomsk, 14–16 okt. 2015 g.* [Electromechanical energy converters: materials of the VII International scientific-technical conf., Tomsk, October 14–16, 2015]. Tomsk, 2015, pp. 70–75 (in Russian).
3. Doroshhenko I. V. Mechanical characteristics of automation electromechanical testing stand based on asynchronous valve cascade converter. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2011, no. 2 (45), pp. 68–72 (in Russian).
4. Doroshhenko I. V. Simulation model of an asynchronous valve cascade in Matlab Simulink. *Issledovanija i razrabotki v oblasti mashinostroenija, jenergetiki i upravlenija: materialy XV nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Gomel', 23–24 apr. 2015 g.* [Research and development in the field of mechanical engineering, energy and management: materials of the XV scientific and technical conf. students, graduate students and young scientists, Gomel, April 23–24, 2015]. Gomel, 2015, pp. 264–267 (in Russian).
5. Doroshhenko I. V., Poguljaev M. N. Simulation model of an asynchronous machine with a wound rotor in MATLAB Simulink. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2021, no. 2 (85), pp. 99–106 (in Russian).
6. Doroshhenko I. V., Poguljaev M. N., Miftakhova N., Zakharenko V. S., Simulation model of an asynchronous machine with wound rotor in matlab simulink. *SUSE-2021 : EC3 Web of Conferences, Kazan, 18–20 Feb. 2021.* Kazan, Kazan Federal University, 2021, vol. 288, pp. 0110. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801110>
7. Mindrin V. I., Pachurin G. V., Rebrushkin M. N. Types and causes of vibration of power machines. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, 2015, no. 5, pp. 32–36 (in Russian).
8. Alekseeva L. B., Uvarov V. P. Causes of occurrence and methods for reducing vibrations of rotary machines. *Nauka i sovremennost'*, 2012, no.18, pp. 172–176 (in Russian).

Поступила 08.09.2023