

ФУНКЦИЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЗВЕНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Белый А.В., Поленов Д.Ю.

Белый Алексей Владимирович (ORCID: 0000-0002-2133-8559),
Поленов Дмитрий Юрьевич (ORCID: 0000-0003-2227-5630)
Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Мытищи, Россия. 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1,
Финансовый университет при правительстве РФ
г. Москва, Россия. 125167, г. Москва, пр-кт Ленинградский, д. 49/2.
E-mail: bely@bmstu.ru, polenov@bmstu.ru

В статье рассмотрены двухзвенные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и приведено описание их работы для электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Исследованы режимы их работы и описаны существующие ограничения, характерные для разных режимов. Предложены меры по снижению ограничений, компенсации перенапряжений. Рассмотрен быстродействующий способ компенсации, воздействующий непосредственно на заданный сигнал угла θ пространственно-векторного модулятора. Разработана структурная схема узла компенсации периодических перенапряжений. Проведено моделирование изменения напряжения в звене постоянного тока при приложении периодической составляющей нагрузки. Представлен вид изменения напряжения в звене постоянного тока при включении компенсатора со структурой. Сделан вывод, что применение компенсации позволяет снизить уровень перенапряжений U_d до уровня 5% от уровня напряжения холостого хода двигателя при условии использования рекомендуемого входного дросселя с номинальным падением напряжения в 4%.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, компенсация перенапряжений

OVERVOLTAGE SUPPRESSION FUNCTION IN THE DC LINK OF A FREQUENCY CONVERTER UNDER PERIODIC LOAD

Bely A.V., Polenov D.Y.

Bely Alexey Vladimirovich (ORCID: 0000-0002-2133-8559),
Polenov Dmitry Yurievich (ORCID: 0000-0003-2227-5630)
Mytishchi Branch (MB) of Bauman Moscow State Technical University,
Mytishchi, Russia. 141005, Moscow region, Mytishchi, st. 1st Institutskaya, 1.
Financial University under the Government of the Russian Federation
Moscow, Russia. 125167, Moscow, Leningradsky Prospekt, 49/2. E-mail: bely@bmstu.ru, polenov@bmstu.ru

The article considers two-link frequency converters with an autonomous voltage inverter and describes their operation for electric drives with squirrel-cage asynchronous motors. Their operating modes are investigated and existing limitations typical for different modes are described. Measures to reduce limitations and compensate for overvoltages are proposed. A high-speed compensation method is considered that directly affects the specified signal of the angle θ of the space-vector modulator. A structural diagram of the periodic overvoltage compensation unit is developed. A simulation of voltage change in the DC link when a periodic component of the load is applied is carried out. A type of voltage change in the DC link is presented when a compensator with a structure is turned on. It is concluded that the use of compensation allows reducing the overvoltage level U_d to 5% of the no-load voltage level of the motor, provided that the recommended input choke with a nominal voltage drop of 4% is used.

Keywords: asynchronous motor, frequency converter, autonomous voltage inverter, over-voltage compensation

ВВЕДЕНИЕ

Современные преобразователи частоты обеспечивают широкий диапазон регулирования скорости двигателей, что делает их незаменимыми в различных отраслях, таких как металлургия, химическая промышленность, водоснабжение и вентиляция. Среди основных принципов работы полупроводниковых преобразователей частоты можно выделить метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который позволяет точно управлять выходной частотой и напряжением, что, в свою очередь, обеспечивает необходимую скорость вращения двигателя.

Использование ШИМ также позволяет минимизировать гармонические искажения, что положительно сказывается на качестве работы всего электропривода. Современные преобразователи частоты оснащены функциями диагностики и защиты, что повышает надежность и долговечность всего оборудования. Интеграция с системами автоматизации и управления позволяет осуществлять мониторинг и управление в реальном времени, что открывает новые горизонты для повышения общей эффективности производственных процессов.

Несмотря на все преимущества, важно учитывать и недостатки, такие как повышенные требования к электроснабжению и необходимость в тщательной настройке и калибровке системы. Однако с развитием технологий и снижением стоимости компонентов, применение преобразователей частоты становится все более доступным и оправданным.

В будущем ожидается дальнейшее совершенствование данных систем, что приведет к их более широкому распространению и интеграции в новые области применения [1-7].

Принципы создания статических преобразователей частоты (ПЧ) для регулируемых электрических приводов известны уже длительное время. Различают три типа статических ПЧ:

- непосредственный ПЧ;
- двухзвенный ПЧ с автономным инвертором тока;
- двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения.

В связи с тем, что двухзвенные преобразователи частоты с диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения (АИН) являются самыми массовыми, в статье рассматриваются именно они. Современные двухзвенные ПЧ с АИН характеризуются высокой степенью интеграции и использованием мощных полупроводниковых технологий, таких как IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), что обеспечивает их эффективность и надежность.

Кроме того, применение цифровых управляющих систем и алгоритмов, таких как векторное управление, позволяет достичь высокой точности регулирования и адаптивности к изменяющимся условиям работы.

Двухзвенные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения остаются одним из наиболее популярных решений для регулирования электроприводов в различных отраслях. Они обеспечивают баланс между производительностью, точностью и экономичностью, что делает их незаменимыми в современных промышленных системах [8-10].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Двухзвенный ПЧ с АИН состоит из трех основных элементов: выпрямителя (B), АИН и промежуточного контура постоянного тока, включающего конденсатор (C) (рис. 1).

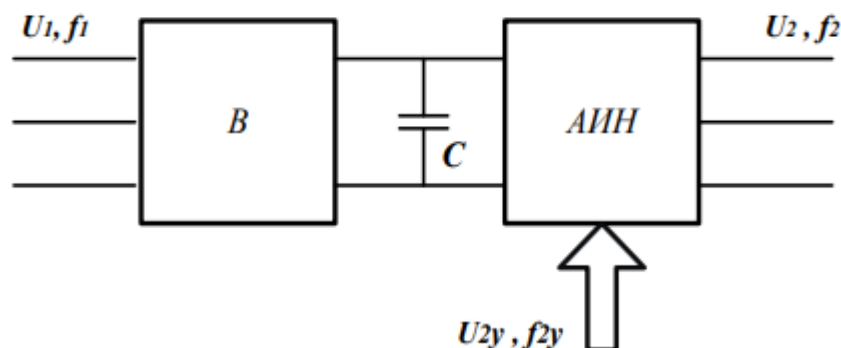


Рис. 1. Двухзвенный ПЧ с АИН
Fig. 1. Two-link inverter with AIN

В преобразователе данного типа осуществляется двойное преобразование электрической энергии: входное переменное напряжение с частотой f_1 выпрямляется. Это происходит в установленном электрическом выпрямителе, принцип работы которого основан на свойствах диодов. Используется электрическая схема на базе полупроводниковых диодов – диодный мост – классическая для подобных случаев. Современные транзисторные инверторы обладают высокой эффективностью и надежностью, что позволяет им использоваться в различных областях, включая промыш-

ленность, транспорт и бытовую электронику. Основными типами транзисторов, применяемых в инверторах, являются IGBT (изолированные дверные транзисторы с биполярным усилением) и MOSFET (металло-оксидные полупроводниковые транзисторы). Эти устройства обеспечивают быструю коммутацию и позволяют минимизировать потери энергии при преобразовании.

Двухзвенные ПЧ с АИН предназначены для электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями (рис. 2) [11-13].

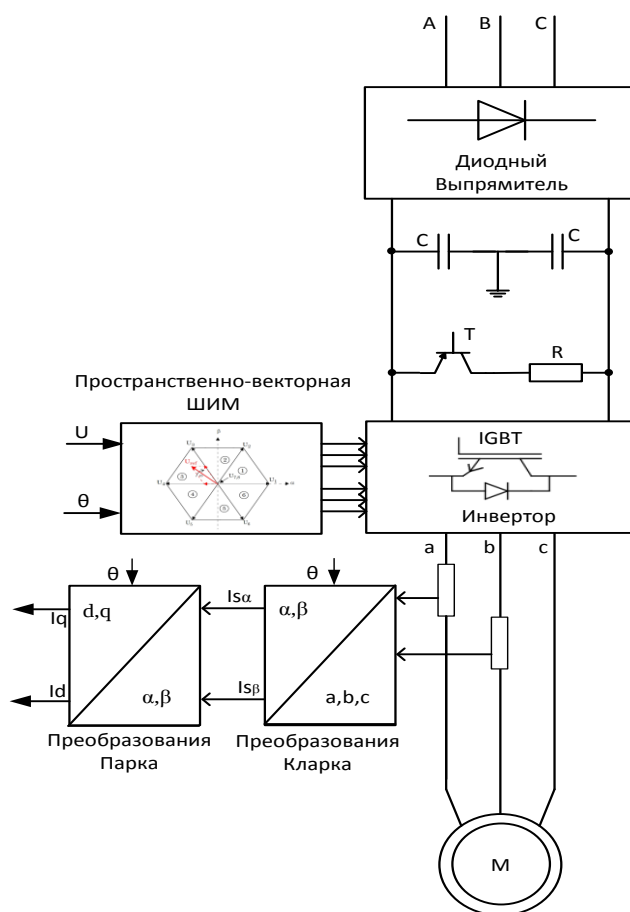


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с преобразователем частоты
Fig. 2. Functional diagram of an electric drive with a frequency converter

Инвертор формирует сигналы напряжения на статорных обмотках двигателя путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Преобразователь частоты имеет две группы конденсаторов в звене постоянного тока для возможности формирования сигналов двухполярной ШИМ. Из всех типов ШИМ в настоящее время наиболее широко используется пространственно-векторный тип. В качестве входных воздействий для нее чаще всего используются управляющие сигналы задания модуля вектора напряжения U и угла поворота дан-

ного вектора θ . Как известно преобразователь частоты может работать как в скалярном, так и в векторном режимах.

Однако в современных системах управления ПЧ и для того, и для другого режима используются преобразования обобщенного тока статора. К таким преобразованиям относятся преобразования Кларка и Парка.

Первое из них проецирует обобщенный вектор тока статора на неподвижные оси α и β , второе – на вращающиеся оси d и q .

В генераторном режиме работы при торможении электропривода электрическая энергия, поступающая от двигателя в звено постоянного тока, не может быть рекуперирована в питающую сеть из-за наличия диодов в составе выпрямителя. Вследствие этого в звене постоянного тока преобразователя частоты возникают перенапряжения, которые могут достигнуть недопустимых значений и вызвать срабатывание соответствующей защиты. Стандартным средством для борьбы с перенапряжениями в звене постоянного тока является подключение через специальный силовой транзистор (T , рис. 2) к преобразователю частоты тормозного сопротивления (R , рис. 2), на котором рассеивается энергия торможения. Однако производители ПЧ предусматривают в системах управления частотного преобразователя меры для ограничения указанных перенапряжений и при отсутствии тормозного сопротивления. Некоторые из этих мер призваны ограничить перенапряжения при нечастых генераторных режимах. К таким средствам, например, относятся: торможение магнитным потоком, компенсация перенапряжений с воздействием на заданную частоту.

Особый случай представляют электроприводы с периодически меняющейся нагрузкой, связанной чаще всего, с преобразованием вращательного движения в возвратно – поступательное. Как правило, такие электроприводы большую часть

времени работают с постоянной скоростью, и частота периодически меняющейся нагрузки соответствует заданной скорости вращения двигателя. В этом случае возникает периодический генераторный режим и при отсутствии тормозного сопротивления может возникнуть необходимость ограничения периодических перенапряжений в звене постоянного тока преобразователя частоты.

Наиболее часто используется следующий способ компенсации описанных выше режимов работы можно описать следующим образом. Преобразователь частоты контролирует моментный ток (I_q) двигателя и регулирует его в соответствии с уставкой I_q , используя ПИ-регулятор. На выходе этого регулятора генерируется сигнал для изменения выходной частоты. Выходная частота увеличивается, чтобы поддерживать ток крутящего момента статора на заданном уровне, избегая переключения в режим генератора и изменения направления тока в противоположную сторону. Таким образом, ток будет оставаться положительным, и поток энергии всегда будет направляться от преобразователя частоты к двигателю. Однако в последнее время рядом производителей ПЧ разработан более быстродействующий способ компенсации, воздействующий непосредственно на заданный сигнал угла θ пространственно-векторного модулятора. Структурная схема узла компенсации приведена на рис. 3.

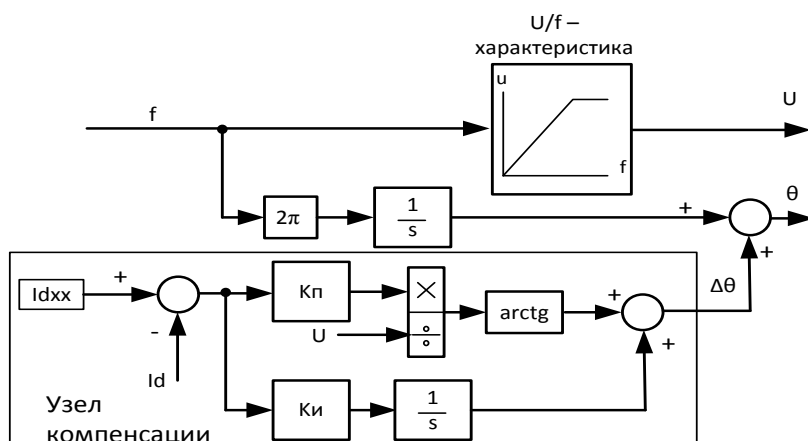


Рис. 3. Структурная схема узла компенсации периодических перенапряжений
Fig. 3. Block diagram of the periodic overvoltage compensation unit

Зависимость приращения угла от тока, реализуемая узлом компенсации представлена в выражении (1):

$$\Delta\theta = \left(\frac{(I_{xx} - I_d) * K_p}{U} \right) + \frac{(I_{xx} - I_d) * K_i}{s}, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент пропорциональной части регулятора; K_i – коэффициент интегральной части регулятора, s – оператор Лапласа.

Узел компенсаций предназначен для скалярной системы управления преобразователя частоты с применением U/f -характеристики. Входным сигналом для данной характеристики является заданная частота f , выходным сигналом – заданное напряжение U . Заданная частота путем интегрирования пропорциональной угловой частоты преобразуется в угол θ .

Сигналы U и θ поступают на блок пространственно-векторного модулятора.

Узел компенсации (рис.3) строится на базе ПИ-регулятора составляющей тока статора I_d с нелинейным адаптивным коэффициентом. Нелинейность определяется использованием функции арктангенса для вычисления угла.

Адаптация осуществляется за счет деления выходного сигнала пропорциональной части регулятора на сигнал, пропорциональный выходному напряжению.

Трудностью реализации данного способа является определение тока составляющей I_d без периодической нагрузки, условно названной током холостого хода I_{dxx} . Однако использование алгоритмов предварительной настройки частотного преобразователя с целью определения его параметров довольно точно определяет эту величину.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлен вид изменения напряжения в звене постоянного тока при приложении периодической составляющей нагрузки.

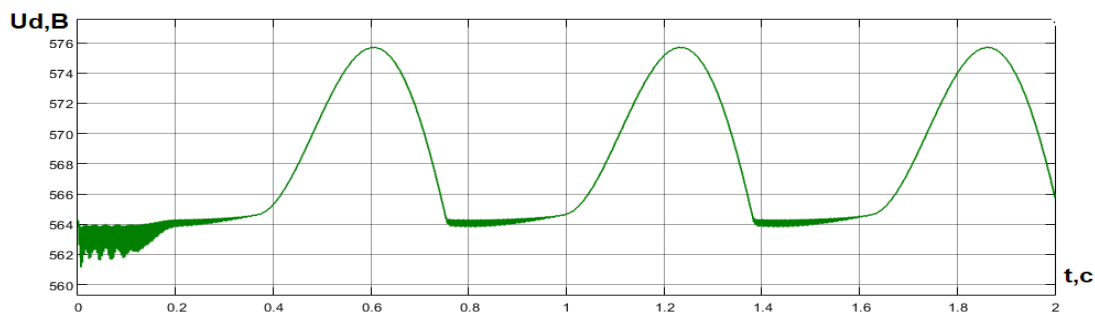


Рис. 4. Увеличение напряжения в звене постоянного тока при приложении периодической нагрузки

Fig. 4. Increase in voltage in the DC link when applying a periodic load

Кривые получены на модели, составленной из блоков физических моделей выпрямителя, инвертора, асинхронного двигателя и системы управления силовыми ключами инвертора на базе пространственно - векторного модулятора. В качестве закона U/f -управления использован закон $U/f = const$ (линейная характеристика с ограничением выше номинальной частоты). Моделирование проводилось на частотах выше половинной от номинала, поэтому особенности работы двигателя на малых частотах не рассматривались. Амплитуда приложенной периодической составляющей момента нагрузки составила 0,9 от номинального момента исследуемого двигателя. Задана зависи-

мость частоты периодической составляющей от скорости. При заданных условиях напряжение в звене постоянного тока достигает 576 В, что для электропривода с номинальным напряжением 380 В не является опасным.

Однако, для сравнения результатов моделирования с работой реальной системы целесообразно рассмотреть работу компенсатора в пределах безопасных для ПЧ уровней напряжения.

На рис. 5 представлен вид изменения напряжения в звене постоянного тока при включении компенсатора со структурой, представленной на рис. 3.

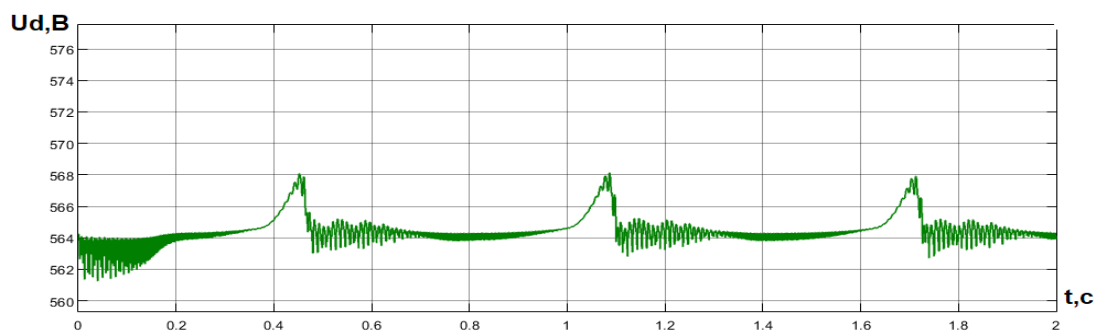


Рис. 5. Изменение напряжения в звене постоянного тока при применении компенсатора перенапряжений

Fig. 5. Change in voltage in the DC link when using a surge compensator

Применение рассмотренной в статье компенсации позволяет снизить уровень перенапряжений U_d до уровня 5% от уровня напряжения холостого хода двигателя при условии использования рекомендуемого входного дросселя с номинальным падением напряжения в 4%.

Желание добиться идеальной компенсации перенапряжений приводит к значительным отклонениям скорости от заданного значения, что в большинстве случаев является нежелательным. Поэтому работу компенсатора следует признать удовлетворительным.

ВЫВОДЫ

В ходе работы получены следующие результаты:

1. Рассмотрены двухзвенные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и приведено описание их работы для электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.
2. Исследованы режимы их работы и описаны существующие ограничения, характерные для разных режимов. Предложены меры по снижению ограничений, компенсации перенапряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешков А.В., Матвеев Я.В.** Преимущества использования матричных преобразователей частоты над двухзвеньевыми преобразователями частоты в системе электропривода. *Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов*. 2018. № 17. С. 339-342. EDN YUFLJJ.
2. **Буров В.Н., Фролов В.Я.** Силовая электроника. Полупроводниковые преобразователи для управления асинхронными двигателями и их энергетическими показателями. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. 2014. 104 с. EDN WHBRXT.
3. **Деревянко А.М., Королев В.В.** Алгоритмы управления преобразователем частоты в интеллектуальной системе преобразователь частоты - асинхронный двигатель. *Наука настоящего и будущего*. 2020. Т. 2. С. 138-140. EDN ALTSMQ.
4. **Каляев М.А., Кирменев А.А.** Реконструкция испытательного стенда для асинхронных двигателей на основе преобразователей частоты. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. С. 275. EDN RMSGRD.
5. **Морозов А.В., Барсуков В.К., Морозов В.А.** Алгоритмы управления и схемотехника матричного преобразователя частоты. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2014. № 1(23). С. 140-144. EDN SNHTTD.

3. Рассмотрен быстродействующий способ компенсации, воздействующий непосредственно на заданный сигнал угла θ пространственно-векторного модулятора. Разработана структурная схема узла компенсации периодических перенапряжений.

4. Проведено моделирование изменения напряжения в звене постоянного тока при приложении периодической составляющей нагрузки.

5. Представлен вид изменения напряжения в звене постоянного тока при включении компенсатора со структурой.

Желание добиться идеальной компенсации перенапряжений приводит к значительным отклонениям скорости от заданного значения, что в большинстве случаев является нежелательным. Поэтому работу компенсатора следует признать удовлетворительным.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Peshkov A.V., Matveev Ya.V.** Advantages of using matrix frequency converters over two-link frequency converters in an electric drive system. *Technology of the 21st century through the eyes of young scientists and specialists*. 2018. N 17. P. 339-342. EDN YUFLJJ.
2. **Burov V.N., Frolov V.Ya.** Power Electronics. Semiconductor Converters for Controlling Asynchronous Motors and Their Energy Performance. Sankt-Peterburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2014. 104 p. EDN WHBRXT.
3. **Derevyanko A.M., Korolev V.V.** Algorithms for controlling a frequency converter in an intelligent system: frequency converter - asynchronous motor. *Science of the present and future*. 2020. T. 2. P. 138-140. EDN ALTSMQ.
4. **Kalyaev M.A., Kirmenev A.A.** Rekonstrukciya ispytatelnogo stenda dlya asinhronnyh dvigatelej na osnove preobrazovatelej chastoty. Current problems of modern science, technology and education: Abstracts of the 81st International Scientific and Technical Conference, Magnitogorsk, April 17–21, 2023. Volume 1. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after. G.I. Nosova, 2023. P. 275. EDN RMSGRD.
5. **Morozov A.V., Barsukov V.K., Morozov V.A.** Control algorithms and circuit design of a matrix frequency converter. *Intelligent systems in production*. 2014. N 1(23). P. 140-144. EDN SNHTTD.
6. **Kolobov M.Yu., Bratkov I.V., Gushchina T.V., Chagin O.V.** Energy- and resource-saving technology for producing spherical graphite. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 2(74). P. 79-87. DOI:10.6060/snt.20237402.0008.

6. Колобов М.Ю., Братков И.В., Гущина Т.В., Чагин О.В. Энерго- и ресурсосберегающая технология получения сферического графита. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 2(74). С. 79-87. DOI:10.6060/snt.20237402.0008.
7. Постникова И.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Колобов М.Ю. Сепарация продуктов избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 4(76). С. 96-102. DOI:10.6060/snt.20237604.00013.
8. Гельвер Ф.А. Каскадный преобразователь частоты для гребных электроприводов большой мощности. *Судостроение*. 2021. № 3(856). С. 47-51. DOI 10.54068/00394580_2021_3_47. EDN NBZEPO.
9. Макаров В.Г., Шаряпов А.М. Анализ спектрального состава выходных напряжений преобразователя частоты электропривода малой мощности. *Вестник Технологического университета*. 2023. Т. 26, № 8. С. 64-70. DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_8_64.
10. Ахметшин Э.Р. Исследование состояния российского рынка многофазных электродвигателей и перспективы их развития до 2025 года. *Молодой ученый*. 2017. № 48. (182). С. 55-60. <https://moluch.ru/archive/182/46803>.
11. Ежова Н.В., Федоров С.В. Использование информационной системы Matlab при разработке преобразователей частоты. *Информационные технологии. Проблемы и решения*. 2020. № 2(11). С. 26-33.
12. Артемов Н.А., Дебелый Д.А., Иванов С.А., Лаврентьев С.А. Совершенствование привода процесса брикетирования кормов применением преобразователя частоты. Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IX международной научно-практической конференции, Саратов, 15–16 апреля 2018 года. Под общ. ред. Трушкина В.А.. Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2018. С. 4-5. EDN VSWXPA.
13. Усанов К.М., Моисеев А.П., Каргин В.А. Четвериков Е.А. Экспериментальная оценка силовых показателей электропривода тросошайбового транспортера с линейным электромагнитным двигателем. *Аграрный научный журнал*. № 6, 2015. С. 69-72. EDN: TXGHJP.
7. Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kolobov M.Yu. Separation of products of selective grinding of apatite-nepheline ore. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 4(76). P. 96-102. DOI:10.6060/snt.20237604.00013.
8. Gelver F.A. Cascade frequency converter for high-power electric propulsion drives. *Shipbuilding*. 2021. N 3(856). P. 47-51. DOI 10.54068/00394580_2021_3_47. EDN NBZEPO.
9. Makarov V.G., Sharyapov A.M. Analysis of the spectral composition of the output voltages of a low-power electric drive frequency converter. *Bulletin of the Technological University*. 2023. T. 26, N 8. P. 64-70. DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_8_64. EDN RSRT0J.
10. Ahmetshin E.R. Study of the state of the Russian market of multiphase electric motors and prospects for their development until 2025. *Young scientist*. 2017. N 48. (182). P. 55-60. <https://moluch.ru/archive/182/46803>. EDN: ZWLPUB
11. Ezhova N.V., Fedorov S.V. Using the Matlab information system in the development of frequency converters. *Information Technology. Problems and solutions*. 2020. N 2(11). P. 26-33. EDN SRUJFC.
12. Artemov N.A., Debelyj D.A., Ivanov S.A., Lavrentiev S.A. Improving the drive of the feed briquetting process using a frequency converter. Current problems of energy in the agro-industrial complex: Materials of the IX international scientific and practical conference, Saratov, April 15–16, 2018. Ed. ed. Trushkina V.A. Saratov: LLC "Center for Social Agroinnovations of SSAU", 2018. P. 4-5. EDN VSWXPA.
13. Usanov K.M., Moiseev A.P., Kargin V.A. Chetverikov E.A. Experimental assessment of the power indicators of the electric drive of a cable washer conveyor with a linear electromagnetic motor. *Agrarian scientific journal*. N 6, 2015. P. 69-72. EDN: TXGHJP.

Поступила в редакцию(Received) 14.12.2024
Принята к опубликованию (Accepted) 21.01.2025