

4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 62-83

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_4_162

EDN: JYWJVD

Способы повышения надежности электропривода и сохранения работоспособности при возникновении неисправностей в сетях питания

**Александр Константинович Муконин^{1✉}, Оксана Георгиевна Левина²,
Наталья Викторовна Прибылова³, Дмитрий Александрович Тонн⁴,
Виктор Александрович Трубецкой⁵**

^{1, 2, 4, 5} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

³ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

¹ mukonin_ak@mail.ru✉

Аннотация. Повышение надежности электроприводов является актуальной задачей, которую необходимо решать еще на этапе проектирования и разработки системы электропривода, так как поломка такой системы может привести к негативным последствиям, в том числе и в сельском хозяйстве. Зафиксированы ситуации, когда неисправность электропривода вентиляции птицеферм, коровников приводила к массовой гибели птиц и скота. В настоящее время в системах вентиляции и кондиционирования широко используются частотно-регулируемые электроприводы. Рассмотрен способ повышения надежности электропривода и сохранения работоспособности при неисправностях, возникающих в сетях питания, в частности при обрыве одного или двух любых проводов сети переменного напряжения. Эта задача может быть решена за счет использования универсального преобразователя частоты (УПЧ). Исследование характеристик частотного электропривода при неисправностях сети переменного напряжения выполняется на основе математического моделирования. Универсальный по питанию преобразователь частоты (УПЧ) отличается от классического преобразователя частоты (ПЧ) соединением общей точки последовательно соединенных конденсаторов фильтра с нулевым проводом трехфазной четырехпроводной сети. Классический ПЧ является частным случаем УПЧ. Применение УПЧ позволяет расширить функциональные возможности частотного электропривода, например поднять верхнюю границу достижимых скоростей. В случае обрыва нулевого провода и одного фазного неуправляемый выпрямитель (НВ) функционирует как однофазный диодный мост. Когда отсутствуют два фазных провода, выпрямитель работает как удвоитель напряжения. Если оборвана одна фаза, выпрямитель можно рассматривать как параллельное соединение двух удвоителей напряжения. Проведенное исследование показывает, что электропривод с универсальным преобразователем по сравнению с классическим оказывает наиболее негативное влияние на питающую сеть, но имеет большее напряжение на входе инвертора и, соответственно, большее выходное напряжение ПЧ.

Ключевые слова: надежность электроприводов, частотно-регулируемый электропривод, работоспособность, обрыв линейного провода, универсальный по питанию преобразователь частоты, диодный мост, удвоитель напряжения

Для цитирования: Муконин А.К., Левина О.Г., Прибылова Н.В., Тонн Д.А., Трубецкой В.А. Способы повышения надежности электропривода и сохранения работоспособности при возникновении неисправностей в сетях питания // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 4(83). С. 162–170. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_162-170.

4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Improving reliability of an electric drive and fail-safety mode in case of malfunctions in the power supply networks

**Aleksandr K. Mukonin^{1✉}, Oksana G. Levina², Natalia V. Pribylova³,
Dmitriy A. Tonn³, Viktor A. Trubetskoy⁴**

^{1, 2, 4, 5} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ mukonin_ak@mail.ru✉

Abstract. Improving the reliability of electric drives is an urgent task that needs to be addressed even at the design and development stage of an electric drive system, since failure of such a system can lead to negative consequences, including in agriculture. Situations have been recorded when a malfunction of the electric ventilation drive of poultry farms and cowsheds led to mass deaths of birds and livestock. Frequency-controlled electric drives are currently widely used in ventilation and air conditioning systems. A method for increasing the reliability of an electric drive and maintaining operability in case of malfunctions in power supply networks, in particular, in case of disconnection of one or two wires of an alternating voltage network, is considered. This task can be solved by using a universal frequency converter (UFC). The study of the characteristics of a frequency electric drive in case of faults in the AC network is carried out on the basis of mathematical modeling. The universal frequency converter (UFC) differs from the classical frequency converter (FC) by connecting a common point of the filter capacitors connected in series with the zero wire of a three-phase four-wire network. The classical FC is a special case of the UFC. The use of an UFC allows expanding the functionality of a frequency electric drive, for example, to raise the upper limit of achievable speeds. In the event of a break in the zero wire and one phase, the uncontrolled rectifier (UR) functions as a single-phase diode bridge. When two phase wires are missing, the rectifier acts as a voltage doubler. If one phase is cut off, the rectifier can be considered as a parallel connection of two voltage doublers. The study shows that an electric drive with a universal converter has the most negative effect on the supply network compared to the classical one, but it has a higher voltage at the input of the inverter and, consequently, a higher output voltage of the drive.

Keywords: reliability of electric drives, frequency-regulated electric drive, operability, line wire breakage, universal power supply frequency converter, diode bridge, voltage doubler

For citation: Mukonin A.K., Levina O.G., Pribylova N.V., Tonn D.A., Trubetskoy V.A. Improving reliability of an electric drive and fail-safety mode in case of malfunctions in the power supply networks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(4):162-170. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_162-170.

К одной из важных задач при проектировании электропривода следует отнести повышение его эксплуатационной надежности. Выход привода из строя может привести к весьма негативным последствиям, в том числе и в сельскохозяйственном производстве. Известны случаи, когда неисправность электропривода вентиляции птицефермы привела к массовой гибели птиц. Например, в 2015 г. на птицефабрике в Воронежской области из-за повреждения линии электропередачи отключилась вентиляция, и 330 тыс. кур задохнулись [8]. В 2023 г. в США из-за отсутствия вентиляции на крупном животноводческом предприятии произошел взрыв метана, погибло более 18 тыс. коров, один человек был тяжело ранен [1].

В настоящее время во многих промышленных установках, в том числе системах вентиляции, широко используются частотно-регулируемые электроприводы [2, 3]. К одному из вариантов повышения надежности электропривода можно отнести сохранение его работоспособности при неисправностях питающей сети. Основная цель выполненного исследования заключалась в поиске возможных способов сохранения работоспособности частотного электропривода при обрыве одного или двух любых проводов сети переменного напряжения.

В частотных приводах малых и средних мощностей обычно применяются преобразователи частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного напряжения, содержащие трехфазный диодный мост, конденсаторный фильтр и автономный инвертор напряжения (АИН) [7, 9, 10]. Классические ПЧ не работают при обрыве двух проводов питания.

Задача сохранения работы частотного привода при обрыве одного или двух любых проводов питающей сети может быть решена за счет использования предложенного в [5, 6] универсального преобразователя частоты (УПЧ).

Исследование характеристик частотного электропривода при неисправностях сети переменного напряжения выполняется на основе моделирования.

Схема универсального преобразователя частоты приведена на рисунке 1.

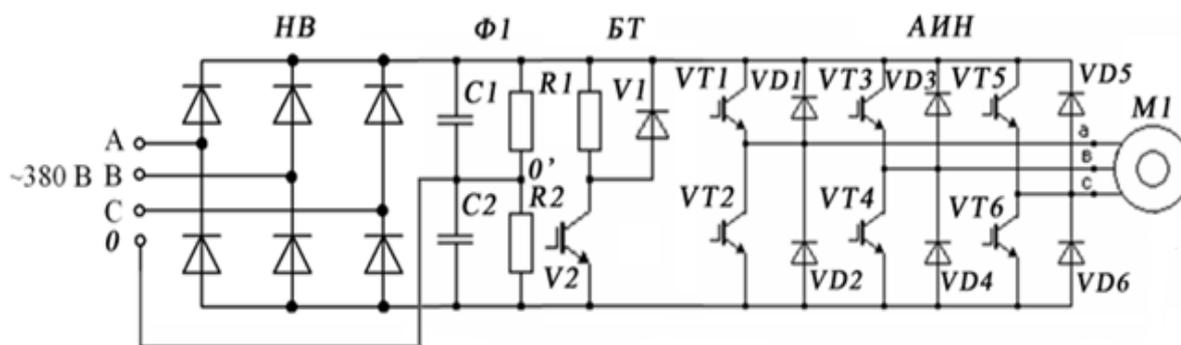


Рис. 1. Схема универсального по питанию преобразователя частоты

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

- НВ – неуправляемый выпрямитель;
- Ф1 – фильтр;
- БТ – блок торможения, необходим для рассеивания энергии при работе двигателя в режиме рекуперативного торможения;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- М1 – двигатель переменного тока.

Рассматриваемый УПЧ отличается от классического преобразователя частоты (ПЧ) подключением к нулевому проводу сети 0 общей точки соединения конденсаторов фильтра O' . Применение УПЧ сохраняет работоспособность привода при обрыве одного или двух любых проводов трехфазной четырехпроводной сети. При обрыве нулевого провода преобразователь работает как классический ПЧ. В случае обрыва нулевого провода и одного фазного блок НВ функционирует как однофазный диодный мост. Когда отсутствуют два фазных провода, выпрямитель работает как удвоитель напряжения. Если оборвана одна фаза, выпрямитель можно рассматривать как параллельное соединение двух удвоителей напряжения.

Характеристики привода исследовались с помощью модели, фрагмент которой приведен на рисунке 2.

Силовая часть включает в себя трехфазный источник напряжения ТИН, диодный мост НВ, конденсаторы С1, С2, трехфазный мостовой автономный инвертор напряжений АИН и асинхронный двигатель (АД) М1.

Система управления содержит, в частности, ПИ-регулятор скорости и блоки преобразований координат ($i_q \rightarrow abc$ и $abc \rightarrow i_q$).

Разрывая те или иные связи блока ТИН с остальной частью модели, можно исследовать работу привода при обрыве проводов питающей сети. Полная модель привода содержит различные измерители, позволяющие определять требуемые параметры и характеристики.

Параметры модели АД рассчитывались для двигателя АИР122М2 со следующими номинальными данными:

- мощность – 7,5 кВт;
- частота вращения – 2890 об/мин;
- момент – 24,7 Нм.

Для определения параметров модели двигателя использовалась методика, описанная Ю.А. Мощинским с соавт. [4].

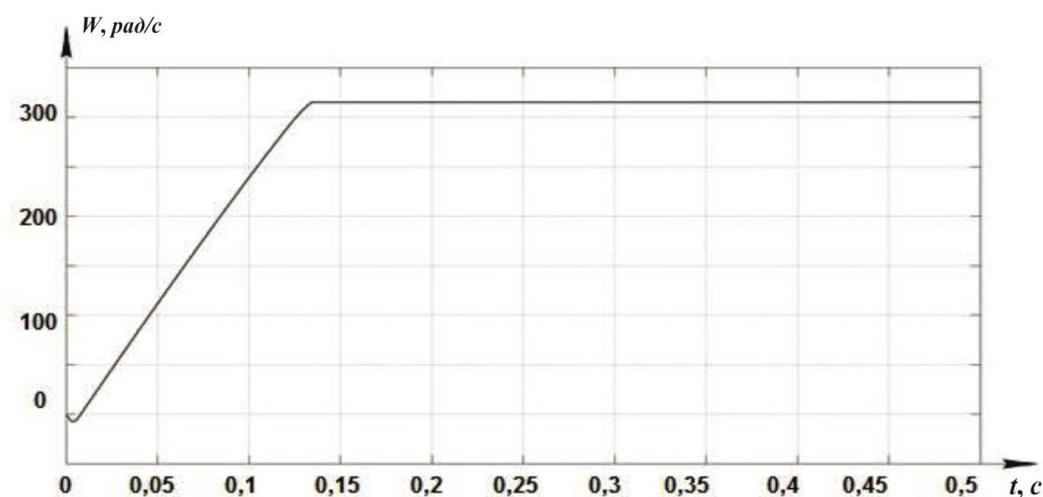
Система управления привода реализована таким образом, что выходной сигнал нелинейного элемента, установленного на выходе ПИ-регулятора скорости, задает электромагнитный момент, при этом ограничение выходного сигнала ограничивает электромагнитный момент. Величина ограничения подобрана таким образом, чтобы обеспечивался максимальный момент привода, вдвое превышающий номинальный момент двигателя.

На первом этапе исследования в модели задавались следующие параметры трехфазного источника напряжений ТИН:

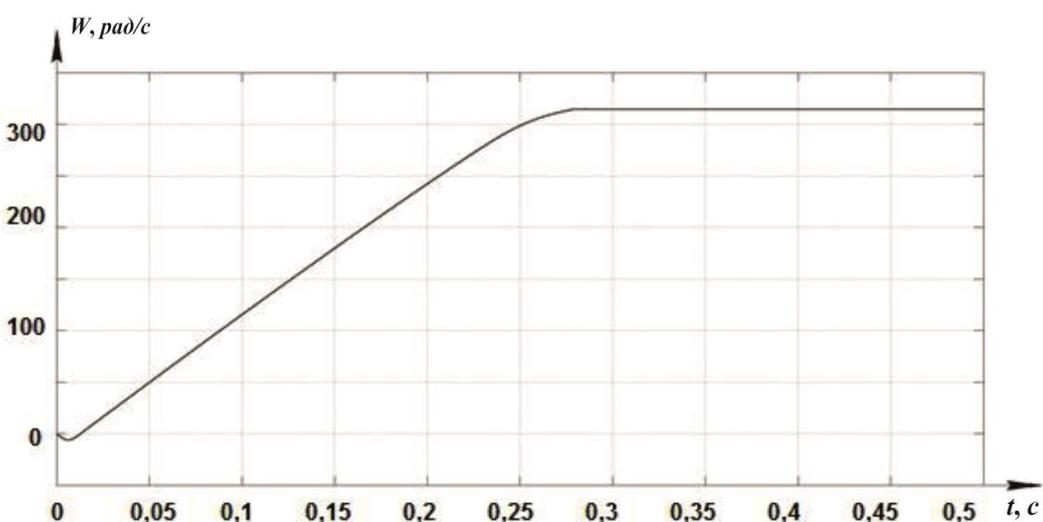
- фазная ЭДС – 220 В;
- частота – 50 Гц;
- индуктивность – 0,1 мГн;
- активное сопротивление – 0,1 Ом;
- емкость конденсаторов фильтра – 2000 мкФ;
- частота коммутации транзисторов АИН – 4 кГц.

Отключение общей точки конденсаторов С1, С2 от общего вывода ТИН (нулевого провода сети) превращает УПЧ в классический преобразователь с трехфазным мостовым выпрямителем.

Сравним некоторые характеристики привода с УПЧ и с классическим ПЧ при заданной угловой скорости 314 рад/с и номинальном моменте двигателя 24,7 Нм. На рисунке 3 приведены графики скорости при пуске приводов.



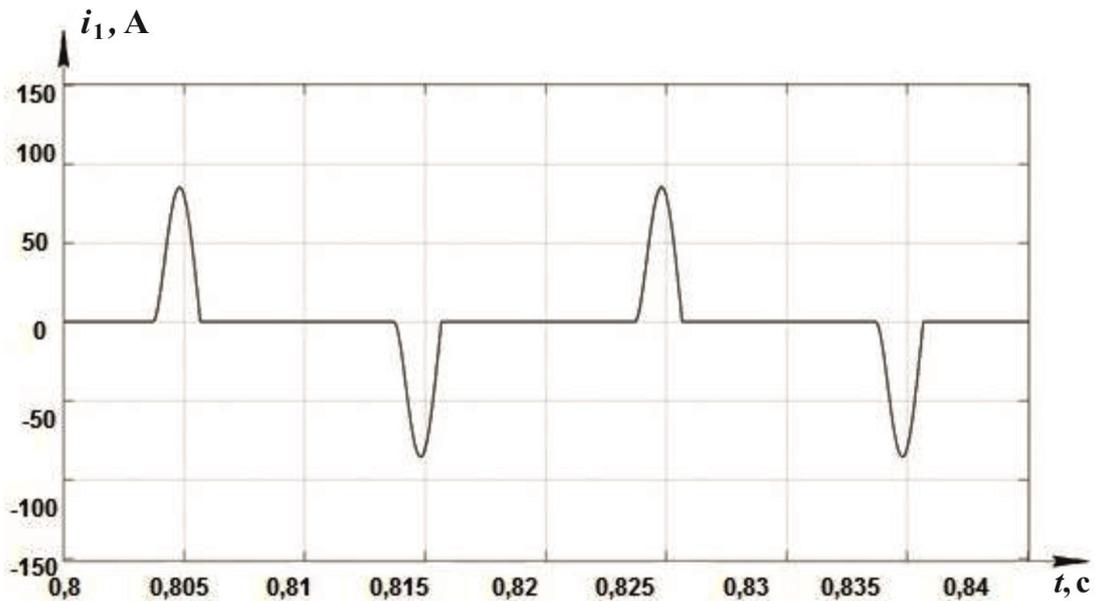
а



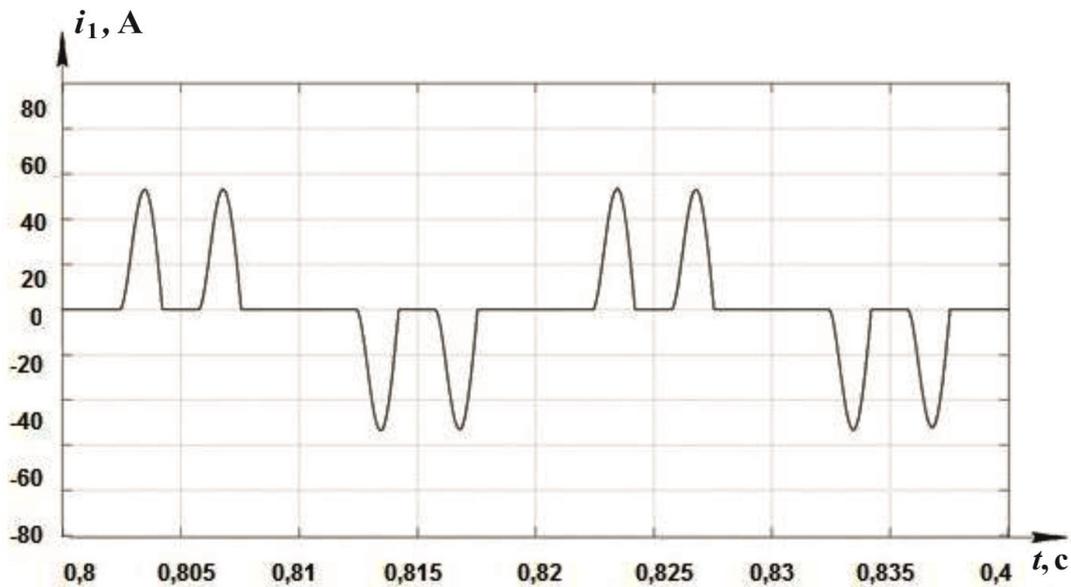
б

Рис. 3. Графики скорости при пуске привода с УПЧ (а) и с классическим ПЧ (б)

Оба привода обеспечивают заданное установившееся значение скорости, равное 314 рад/с. Графики тока одной фазы источника питания приведены на рисунке 4.



а



б

Рис. 4. Графики тока одной фазы источника питания электропривода с УПЧ (а) и с классическим ПЧ (б)

Амплитудные значения токов: $I_{1m_y} = 85,5 \text{ A}$, $I_{1m_k} = 53,3 \text{ A}$.

Действующие значения токов: $I_{D_y} = 25,03 \text{ A}$, $I_{D_k} = 21,23 \text{ A}$.

Индексы *y* и *k* соответствуют приводам с УПЧ и с классическим ПЧ.

Средние значения напряжений на входах АИН: $U_{d_y} = 601,4 \text{ В}$, $U_{d_k} = 525,6 \text{ В}$.

Коэффициенты мощности энергии, потребляемой от источника питания: $K_{m_y} = 0,527$, $K_{m_k} = 0,625$.

Таким образом, привод с универсальным преобразователем частоты по сравнению с классическим оказывает более негативное влияние на питающую сеть, но имеет большее напряжение на входе инвертора и, соответственно, большее выходное напряжение ПЧ.

Плавно увеличивая момент нагрузки и измеряя скорость, можно определить механические характеристики привода.

Характеристики приводов с универсальным преобразователем частоты и с классическим ПЧ приведены на рисунке 5.

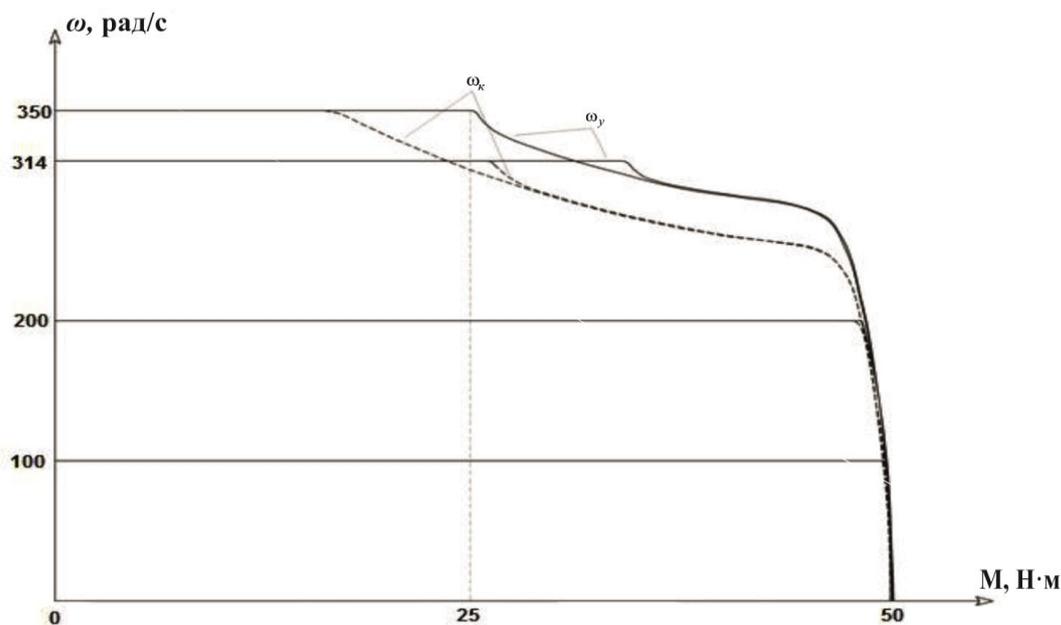


Рис. 5. Механические характеристики приводов с УПЧ (сплошные линии) и с классическим ПЧ (пунктирные линии)

Характеристики, приведенные на рисунке 5, получены для четырех значений задаваемой скорости: 350, 314, 200 и 100 рад/с.

Из данных рисунка 5 следует, что при относительно высоких скоростях привод с УПЧ за счет увеличенных напряжений питания двигателя обеспечивает большую перегрузочную способность и больший диапазон регулирования скорости. Привод с классическим ПЧ при частоте 350 рад/с не обеспечивает создания номинального момента.

Также выполнялось моделирование приводов при обрыве одного или двух линейных проводов питающей сети. Некоторые результаты моделирования приведены в таблице.

Параметры электропривода при обрыве линейных проводов питающей сети

$\omega_y, \text{ рад/с}$	$\omega_k, \text{ рад/с}$	$I_{m_y}, \text{ А}$	$I_{m_k}, \text{ А}$	$I_{D_y}, \text{ А}$	$I_{D_k}, \text{ А}$	K_{my}	K_{mk}	$U_{d_y}, \text{ В}$	$U_{d_k}, \text{ В}$
Обрыв одного линейного провода сети									
314,5	291	158	125	50	38	0,54	0,4	576	485
Обрыв двух линейных проводов сети									
288	–	220	–	72	–	0,5	–	480	–

В данной таблице приняты следующие обозначения:

- ω_k , ω_y – максимальные значения получаемой скорости при номинальной нагрузке АД;

- I_{m_k} , I_{m_y} – амплитуды тока сети;

- I_{D_k} , I_{D_y} – действующие значения тока сети;

- K_{mk} , K_{my} – коэффициенты мощности;

- U_{d_k} , U_{d_y} – средние значения напряжения на входе АИН.

Индексы k и y соответствуют классическому ПЧ и УПЧ.

Классический ПЧ при обрыве двух проводов питания неработоспособен, а привод с УПЧ обеспечивает функционирование при обрыве двух линейных проводов питающей сети. При обрыве одного провода в приводе с УПЧ обеспечиваются большие скорости, чем в классическом приводе.

Выводы

1. Универсальный по питанию преобразователь частоты (УПЧ) отличается от классического преобразователя частоты (ПЧ) соединением общей точки последовательно соединенных конденсаторов фильтра с нулевым проводом трехфазной четырехпроводной сети. Классический ПЧ является частным случаем УПЧ.

2. Применение УПЧ позволяет расширить функциональные возможности частотно-го электропривода, в частности поднять верхнюю границу достижимых скоростей.

3. Использование УПЧ повышает надежность электропривода за счет сохранения работоспособности при обрыве.

Список источников

1. Васильев А. В результате взрыва на молочной фабрике в Техасе погибло более 18 тысяч коров [Электронный ресурс] // Российская газета RGRU. 13.04.2023. URL: <https://rg.ru/2023/04/13/v-rezultate-vzryva-na-molochnoj-fabrike-v-tehase-pogiblo-bolee-18-tysiach-korov.html> (дата обращения: 28.02.2024).

2. Зайцев Д.Н. Частотно-регулируемый энергосберегающий электропривод молочных насосов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды международной научно-технической конференции. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2010. Т. 3. С. 175–180.

3. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. 2007. № 13. С. 41–48.

4. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кириякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38–42.

5. Муконин А.К. Схемы преобразователей частотного электропривода при питании от однофазного напряжения // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы региональной научно-технической конференции. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2005. С. 58–59.

6. Муконин А.К., Шиянов А.И. Частотные приводы с токовым управлением. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2006. 142 с.

7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением: учебник для студентов вузов. Москва: Академия, 2006. 272 с.

8. Шевченко С. В Воронежской области задохнулись 330 тысяч кур. Тушки отправили на утилизацию [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. 27 июля 2015 г. URL: <https://www.vrn.kp.ru/online/news/2120143/> (дата обращения: 28.02.2024).

9. ACS355: user's manual. URL: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf (дата обращения: 28.02.2024).

10. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung. URL: https://siemens-drives.ru/files/lists/s_Directories/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_ru_1006.pdf (дата обращения: 06.04.2024).

References

1. Vasiliev A. As a result of an explosion at a dairy factory in Texas, more than 18 thousand cows were killed. *Rossiyskaya Gazeta RGRU*. Published 13.04.2023. URL: <https://rg.ru/2023/04/13/v-rezultate-vzryva-namolochnoj-fabrike-v-tehase-pogiblo-bolee-18-tysiach-korov.html>. (In Russ.).

2. Zaitsev D.N. Frequency-controlled energy-saving electric drive of milk pumps. In: *Energy Supply and Energy Saving in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Electrification. 2010;3:175-180. (In Russ.).

3. Lazarev G.B. Frequency-controlled electric drive of pumping and fan installations as an effective technology of energy and resource saving at thermal power plants. *Power Electronics*. 2007;13:41-48. (In Russ.).

4. Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Determination of parameters of the asynchronous machine replacement scheme based on catalog data. *Electricity*. 1998;4:38-42. (In Russ.).

5. Mukonin A.K. Circuits of frequency drive converters powered by single-phase voltage. In: *Automation and Robotization of Technological Processes: Proceedings of the Regional Scientific and Technical Conference*. Voronezh: Voronezh State Technical University Publishers; 2005:58-59. (In Russ.).

6. Mukonin A.K., Shiyarov A.I. Frequency drives with current control. Voronezh: Voronezh State Technical University Publishers; 2006. 142 p. (In Russ.).

7. Sokolovsky G.G. Alternating current electric drives with frequency control: textbook for university students. Moscow: Akademiya Publishers; 2006. 272 p. (In Russ.).

8. Shevchenko S. Thirty thousand and thirty chickens suffocated in Voronezh Oblast. Dead birds were sent for disposal. *Komsomolskaya Pravda*. July 27, 2015. URL: <https://www.vrn.kp.ru/online/news/2120143/>. (In Russ.).

9. ACS355: user's manual. URL: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf. (In Russ.).

10. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung. URL: https://siemens-drives.ru/files/lists/s_Directories/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_ru_1006.pdf. (In Russ.).

Информация об авторах

А.К. Муконин – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», mukonin_ak@mail.ru.

О.Г. Левина – электроник 1-й категории кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», oksana.lev@inbox.ru.

Н.В. Прибылова – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматике ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», n.pribylova@mail.ru.

Д.А. Тонн – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», tonnda@yandex.ru.

В.А. Трубецкой – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», viktortrubetskoi@yandex.ru.

Information about the authors

A.K. Mukonin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, mukonin_ak@mail.ru.

O.G. Levina, Electronics Engineer of the 1st Category, the Dept. of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, oksana.lev@inbox.ru.

N.V. Pribylova, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, n.pribylova@mail.ru.

D.A. Tonn, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, tonnda@yandex.ru.

V.A. Trubetskoy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, viktortrubetskoi@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 12.08.2024; одобрена после рецензирования 26.09.2024; принята к публикации 10.10.2024.

The article was submitted 12.08.2024; approved after reviewing 26.09.2024; accepted for publication 10.10.2024.

© Муконин А.К., Левина О.Г., Прибылова Н.В., Тонн Д.А., Трубецкой В.А., 2024