

Одинцов К.Э., Петушков М.Ю., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Лыгин М.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Характерной особенностью отечественных металлургических предприятий является наличие собственных электростанций, использующих в качестве топлива вторичные топливные газы – доменный и коксовый. Такие электростанции имеют относительно сложную систему собственных нужд, неотъемлемой частью которой являются различные электроприводы, в том числе частотно-регулируемые. Преобразователи частоты (ПЧ), являющиеся отличительным звеном указанных систем электропривода, имеют определенные технические особенности, которые должны учитываться при их проектировании и эксплуатации. В статье рассмотрен вопрос обеспечения устойчивой работы частотно-регулируемых приводов (ЧРП) заводских электростанций металлургических производств при нарушениях внешнего электроснабжения. Представлены различные технические решения, позволяющие повысить надежность работы систем ЧРП. Указаны возможные способы резервирования ПЧ и их отдельных элементов, приведены соответствующие структурные схемы. Предложен вариант использования устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) как средства осуществления быстрого переключения между основным и резервным вводами при различных отклонениях напряжения сети. Рассмотрена возможность применения статического компенсатора реактивной мощности для управления состояниями вводов в системах, содержащих ПЧ. Представлены особенности вентильно-индукторных двигателей, обладающих повышенной устойчивостью к нарушениям электроснабжения.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, прерывания напряжения, заводские электростанции, ответственные электроприемники, электропривод насосных установок, быстродействующий автоматический ввод резерва, резервирование выпрямителей, частотный преобразователь, статический компенсатор, вентильно-индукторный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления технологического процесса на современных тепловых электростанциях задействовано большое количество вспомогательного оборудования, оснащенного регулирующими электроприводами. Благодаря высокому уровню развития современной силовой электроники, широкое применение преобразователей частоты для регулируемых электроприводов стало в настоящее время характерной, знаковой чертой.

Особенностью заводских электростанций металлургических производств является активное использование вторичных топливных газов – доменного и коксового. Находясь непосредственно на территории предприятия, такие электростанции приносят существенную экономическую выгоду – вырабатываемая на них электроэнергия оказывается в 2-2,5 раза дешевле покупной, получаемой из внешней энергосистемы [1].

Вспомогательным оборудованием заводских электростанций являются конденсатные, питательные, дренажные, циркуляционные и сетевые насосы, насосы охлаждающей воды, дымососы и дутьевые вентиляторы. Безаварийная и эффективная работа электростанции в целом во многом зависит от надежности электроприводов этих устройств, поэтому некоторые из них, например приводы сетевых и питательных насосов, дымососов и дутьевых вентиляторов котлов, относятся к электроприемникам первой категории надежности, перебои в работе которых недопустимы, поскольку приводят к серьезным повреждениям основного теплотехнического оборудования станции (паровые и газовые взрывы котлов, гидроудары) и нарушениям электро- и теплоснабжения потребителей. В связи с этим ставятся жесткие технологические условия по бесперебойной работе электроприводов вспомогательного оборудования. Например, при прекращении электропитания привода сетевого насоса его частота вращения должна быть восстановлена в течение 4–10 с, а привода тягодутьевого агрегата или дутьевого вентилятора – в течение 3–4 с [2]. Поэтому остро стоит

вопрос о недопустимости прерываний питающего напряжения, что подразумевает, во-первых, повышение надежности электроснабжения ответственных потребителей, а во-вторых, устойчивость преобразователей частотных (ПЧ) к возможным случайным провалам напряжения. Для достижения наибольшей эффективности предлагаемых решений целесообразно использовать технические возможности самих ПЧ.

Известно, что одним из основных способов повышения надежности электроснабжения является резервирование питающих линий. При использовании такого подхода в системах с частотно-регулируемыми электроприводами необходимо учитывать некоторые особенности в их работе. Несмотря на очевидные преимущества ПЧ, такие как широкий диапазон регулирования, высокая экономическая эффективность и удобство эксплуатации, имеют место и недостатки, в число которых входит чувствительность ПЧ к качеству входного напряжения [3]. Это отражается в том, что при различных нарушениях напряжения сети, к которым относятся провалы, перенапряжения и потери напряжения, срабатывает защита ПЧ, причем длительность таких отклонений может составлять всего лишь единицы периодов промышленной частоты сети. Высокая степень чувствительности защит, предусмотренных в частотных преобразователях, как по входу, так и по выходу, необходима, в первую очередь, для сохранения их сложной и дорогостоящей элементной базы, что в особенности касается высоковольтных ПЧ большой мощности.

ВЗАИМОРЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

Одним из возможных вариантов обеспечения бесперебойной работы ответственных потребителей тепловых электростанций является взаиморезервирование ЧРП. В [2] указывается на возможность использования двух ПЧ, питаемых от независимых вводов, для привода двух насосных агрегатов, одновременно находящихся в работе (рис. 1). При отказе первого насоса и падении давления в теплосети автоматически повышается частота вращения двигателя второго насоса и восстанавливается нормальный режим подачи воды.

© Одинцов К.Э., Петушков М.Ю., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Лыгин М.М., 2021

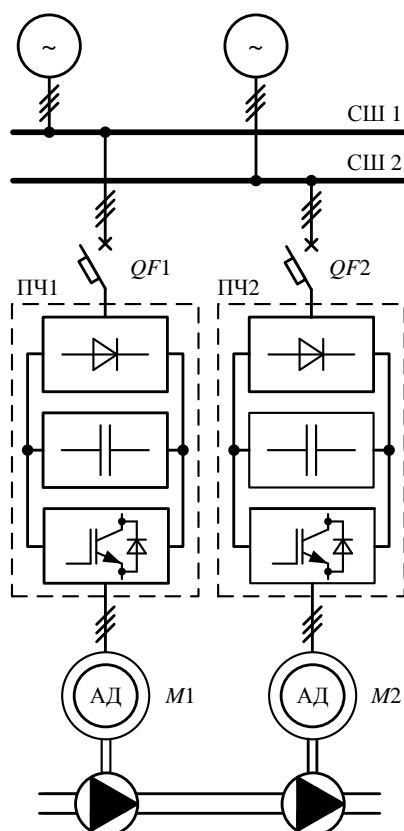


Рис. 1. Схема взаиморезервирования двух ЧРП

Недостатком данного метода является нерациональное энергопотребление, связанное с совместной работой двух недогруженных насосов, и значительные затраты на дорогостоящее оборудование, монтаж и обслуживание, поэтому его широкое применение на практике является сомнительным.

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВР

Другим вариантом повышения надежности ЧРП, при котором отпадает необходимость в использовании двух ПЧ, является питание одного выпрямителя, находящегося в составе ПЧ от двух независимых секций шин. Важным здесь является то, что переключение между основным и резервным вводами должно быть осуществлено в течение единиц периодов частоты питающей сети, что требует применения быстродействующей автоматики и современной коммутационной аппаратуры.

Реализация этих требований может быть осуществлена с применением устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР), которые получают все большее распространение в сетях 6-10 кВ при работе с двигательной нагрузкой (синхронные и асинхронные двигатели).

БАВР состоит из высоковольтных вакуумных выключателей, индукционно-динамических устройств управления приводами этих выключателей (ИДУУ) и быстродействующего микропроцессорного пускового устройства АВР (МБПУ АВР) [4].

Согласно [5], питание ЧРП ответственных потребителей от двух независимых вводов с использованием БАВР может быть осуществлено согласно схеме, представленной на рис. 2.

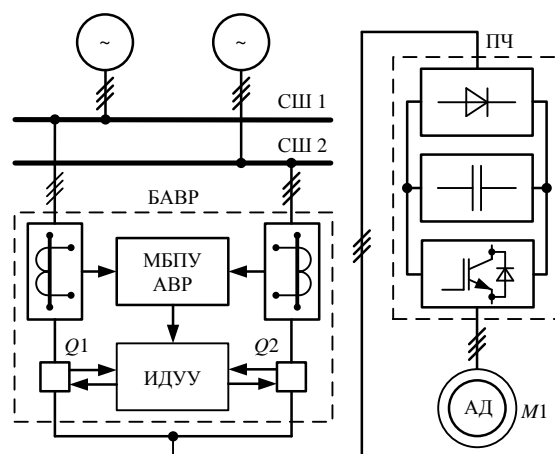


Рис. 2. Схема питания ПЧ от двух независимых вводов с применением БАВР

Современные БАВР, выпускаемые отечественными (ЧЭАЗ, Таврида Электрик) и зарубежными (ABB) производителями, характеризуются небольшой длительностью полного цикла переключения на резервный источник, которая зависит от типа аварийной ситуации в энергосистеме и в среднем составляет от 20 до 60 мс [6-8]. К недостаткам такого подхода можно отнести усложнение схемы электроснабжения и внесение проблем по селективности устройств защиты и загруженности вводов [2].

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПЧ

Кроме применения вышеупомянутых методов повышения надежности электроснабжения, бесперебойная работа ЧРП может быть осуществлена с помощью резервирования выпрямителей, входящих в состав одного ПЧ [9-11]. Так, в [9] предлагается питание основного (В1) и резервного (В2) выпрямителей ПЧ от двух независимых секций шин (рис. 3). При провале или потере напряжения на одном из вводов резервный выпрямитель поддерживает заданный уровень напряжения на входе емкостного фильтра, что обеспечивает сохранение работоспособности ЧРП при отклонениях напряжения сети.

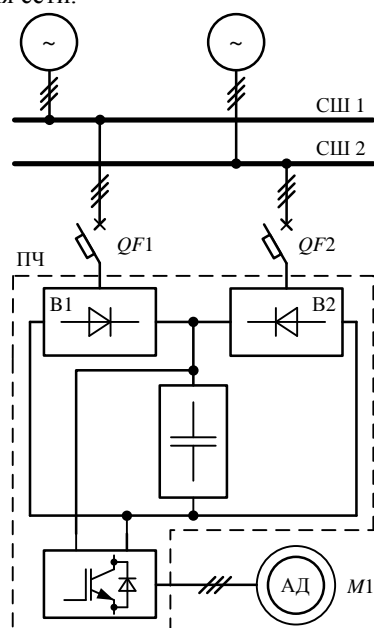


Рис. 3. Схема питания ПЧ с резервированием выпрямителей

Для более равномерного распределения нагрузки между вводами, к которым подключены основной и резервный выпрямители, авторы предлагают техническое решение, описанное в [10, 11] и основанное на применении стабилизирующего устройства – статического компенсатора. Однако применение данного подхода существенно усложняет схему питания ПЧ и требует значительных вложений на его реализацию. В то же время эффективность предложенного решения остается под вопросом.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Помимо различных решений, предполагающих внесение изменений в схемотехнику применяемых ПЧ и совершенствование системы электроснабжения, радикальным методом повышения надежности является внедрение специальных машин переменного тока – вентильно-индукторных двигателей (ВИД) вместо привычных синхронных и асинхронных приводов.

ВИД, особенности которого подробно описаны в [12], представляет собой многосекционную электрическую машину с безобмоточным ротором и независимыми статорными обмотками, каждая из которых питается от собственного ПЧ (рис. 4).

Отметим, что используемые для работы с ВИД преобразователи частоты конструктивно ничем не отличаются от ПЧ, входящих в состав асинхронного и синхронного ЧРП.

Высокая надежность, живучесть, бесперебойность работы таких машин обеспечивается наличием нескольких секций, имеющих независимое электропитание, что делает возможным их применение в качестве регулируемых электроприводов ответственных механизмов. Об этом свидетельствует успешное использование вентильно-индукторных приводов для сетевых насосов на ряде районных теплостанций г. Москвы [12]. Отмечены высокий уровень надежности и уникальная отказоустойчивость таких приводов, что, в целом, оправдывает значительные капитальные вложения на их разработку и внедрение. В настоящее время ведутся работы по созданию новых ВИД, обладающих улучшенными характеристиками и меньшей стоимостью, и совершенствованию систем управления приводами на их основе [13].

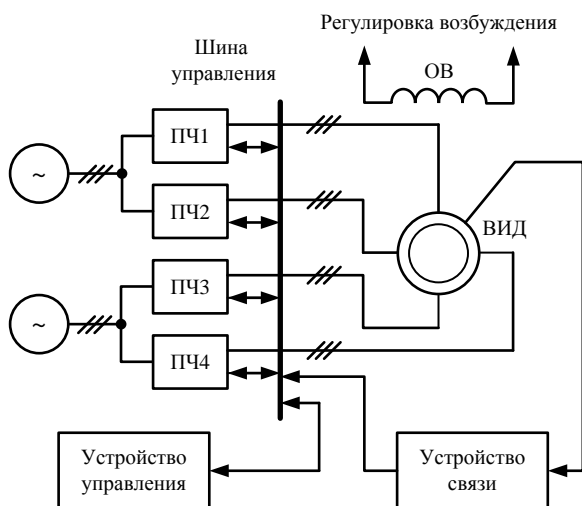


Рис. 4. Схема питания и управления 4-секционного ВИД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургия является одной из базовых отраслей, определяющих уровень экономического состояния страны. Для успешного ее развития и продвижения продукции на мировом и внутреннем рынках, стратегической является задача снижения себестоимости ее продукции. Эта цель достижима за счет внедрения энергосберегающих технологий и уменьшения стоимости электроэнергии. Этому способствует развитие собственной генерации и расширение парка заводских электростанций, работающих на вторичных топливных газах. Залогом успешной работы таких электростанций является в том числе высокий уровень надежности электроприводов, задействованных в технологическом процессе.

Для более детального исследования и получения количественных показателей, предложенных в данной работе технических решений предлагается провести математическое моделирование электротехнических комплексов, оснащенных ЧРП, в различных условиях работы, в том числе с учетом влияния параметров питающей сети [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Копцев // Металлург. 2021. № 7. С. 81-89.
2. Энергосбережение в теплотехническом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: монография / Крылов Ю.А., Медведев В.Н., Карандаев А.С., Корнилов Г.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 202 с.
3. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева, А.Р. Губайдуллин, Р.Р. Галлямов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 79-84.
4. Микропроцессорный быстродействующий АВР как средство повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей / С.И. Гамазин, А.В. Битиев, Д.Т. Гумиров, В.А. Жуков, С.А. Цырук, В.М. Пупин // Проблемы энергетики. 2006. № 11-12. С. 7-12.
5. Астахов Р.А., Пупин В.М. Применение БАВР в системах электроснабжения насосных станций // Вестник трубопроводных технологий. 2019. № 1(3). С. 50-53.
6. Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва БАВР-В: техническое описание. URL: https://www.cheaz.ru/assets/images/production/12-garp/4-bavr/tech_28082019.pdf (дата обращения 01.09.2021).
7. Устройство быстродействующего АВР БАВР-10: техническая информация. URL: https://www.tavrida.com/upload/iblock/403/TER_CBdoc_P G_2.pdf (дата обращения 01.09.2021).
8. Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва SUE 3000: техническое описание. URL: <https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfef/DS%20SUE%203000%20Prod-Datenblatt%20RUS.pdf> (дата обращения 01.09.2021).
9. Пат. 32333 Российская Федерация, МПК H02P 5/00. Устройство для регулирования частоты напряжения питания электродвигателей переменного тока / Станкевич С.Н., Крылов Ю.А.; заявитель ООО «Научно-производственная фирма «Эксперт». № 2003102722/20, заявл. 04.02.2003, опубл. 10.09.2003.
10. Пат. 110877 Российская Федерация, МПК H02J9/06.

- Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Карандаев А.С., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Ровнейко В.В., Галлямов Р.Р.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2011130079/07, заявл. 19.07.2011, опубл. 27.11.2011.
11. Пат. 120294 Российская Федерация, МПК H02M5/40. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Карандаев А.С., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Мурзинов А.А., Медведев В.Н.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2012116730/07, заявл. 24.04.2012, опубл. 10.09.2012.
12. Вентильно-индукторный привод – перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / В.Ф. Козаченко, А.М. Русаков, А.В. Сорокин, Ю.И. Кочанов, А.А. Ионов, Д.В. Тарасов // Новости теплоснабжения. 2011. № 11(135). С. 21-28.
13. Корнеев А.А., Третьяков А.С., Капитонов О.А. Перспективы развития вентильно-индукторного привода // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 3(60). С. 63-69.
14. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учебное пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Мурзинов А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 235 с.

Поступила в редакцию 30 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE CRITICAL ELECTRIC DRIVES RELIABILITY AT INDUSTRIAL POWER PLANTS OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Konstantin E. Odintsov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eltech_mgtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0699-6016>

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of electronics and microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Evgeniy F. Ivanov

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ivanov.ef@mmk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5207-2810>

Aleksey A. Bochkarev

Student, Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Eanalogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eligin@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

The distinguishing feature of domestic metallurgical enterprises is the on-site power plants using secondary fuel gases as fuel, in particular, blast furnace and coke oven gases. Such power plants have a relatively complex system of in-house needs, an integral part of which are various electric drives, including variable frequency drives (VFD). Frequency converters (FC), which are the distinctive link of the specified electric drive systems, have certain technical features that must be considered in the design and operation process. The article considers the issue of providing the stable VFD operation of on-site power plants at metallurgical enterprises in case of external power supply interruptions. Various technical solutions are presented to improve the reliability of VFD systems. Possible ways of the FC and their individual parts backup are shown, the corresponding structural diagrams are given. It is proposed to use high-speed automatic transfer switch devices (high-speed ATS) as a means of implementing fast switching between the main and reserve inputs at various interruptions of the mains voltage. The possibility of using a static varcompensator for controlling the

inputs state in systems which contain FC is considered. The features of the switched reluctance motors with increased stability to power supply disturbances are presented.

Keywords: reliability of power supply, voltage interruptions, industrial power plants, reliable electrical receivers, electric drive of pumps, high-speed ATS, rectifiers backup, frequency converter, static var compensator, switched reluctance motor.

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Gazizova O.V., Koptsev L.A. Power Supply Features of Metallurgical Iron-and-Steel Works and Possible Development Prospects. *Metallurg* [Metallurgist], 2021, no. 7, pp. 81-89. (In Russian)
2. Krylov Yu.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energosberezhenie v teplotekhnicheskoy khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Energy Saving in the Municipal Heat Engineering Economy by Means of a Regulated Electric Drive]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)

3. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaidullin A.R., Gallyamov R.R. Ways to Increase the Frequency-Controlled Electric Drive Stability in Case of Power Supply Disturbances. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of NMSTU], 2011, no. 4, pp. 79-84. (In Russian)
4. Gamazin S.I., Bitiev A.V., Gumirov D.T., Zhukov V.A., Tsyruk S.A., Pupin V.M. Microprocessor-Based High-Speed ATS as a Means of Increasing Power Supply Reliability to Essential Services. *Problemy energetiki* [Energy Sector Problems], 2006, no. 11-12, pp. 7-12. (In Russian)
5. Astakhov R.A., Pupin V.M. High-Speed ATS Application in Power Supply Systems of Pumping Stations. *Vestnik truboprovodnykh tekhnologiy* [Bulletin of Pipe-Wire Technologies], 2019, no. 1(3), pp. 50-53. (In Russian)
6. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vvoda rezerva BAVR-V: tekhnicheskoe opisanie* (High-speed Automatic Transfer Switch BAVR-V: technical description). Available at: https://www.cheaz.ru/assets/images/production/12-garp/4-bavr/tech_28082019.pdf. (accessed 01 September 2021). (In Russian)
7. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego AVR BAVR-10: tekhnicheskaya informatsiya* (Device of High-Speed ATS BAVR-10: technical description). Available at: https://www.tavrida.com/upload/iblock/403/TER_CBdoc_P_G_2.pdf. (accessed 01 September 2021). (In Russian)
8. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vvoda rezerva SUE 3000: tekhnicheskoe opisanie* (Device of High-Speed Automatic Transfer Switch SUE 3000: technical description). Available at: [https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfef/DS%20SUE%203000%20Prod-](https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfef/DS%20SUE%203000%20Prod-Datenblatt%20RUS.pdf)
- [Datenblatt%20RUS.pdf](https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfef/DS%20SUE%203000%20Prod-Datenblatt%20RUS.pdf). (accessed 01 September 2021). (In Russian)
9. Stankevich S.N., Krylov Yu.A. *Ustroystvo dlya regulirovaniya chastoty napryazheniya pitaniya elektrodvigatelya peremennogo toka* [A Device for Regulating the Frequency of the Supply Voltage of AC Electric Motors]. Patent RF, no. 32333, 2003.
10. Karandaev A.S., Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Rovneiko V.V., Gallyamov R.R. *Preobrazovatel chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency Converter for Continuous Electric Drive]. Patent RF, no.110877, 2011.
11. Karandaev A.S., Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Medvedev V.N. *Preobrazovatel chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency Converter for Continuous Electric Drive]. Patent RF, no. 120294, 2012.
12. Kozachenko V.F., Rusakov A.M., Sorokin A.V., Kochanov Yu.I., Ionov A.A., Tarasov D.V. Switched Reluctance Drive as a Promising Direction of a Modern Controlled Electric Drive Development. *Novosti teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], 2011, no. 11(135), pp. 21-28. (In Russian)
13. Korneev A.A., Tretyakov A.S., Kapitonov O.A. Prospects of the Switched Reluctance Drive Development. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2018, no. 3(60), pp. 63-69. (In Russian)
14. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy* [Modeling of Electrotechnical Complexes for Metallurgical Enterprises]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)

Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушков, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 28-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32)

Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M. Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-28-32)