

*Секция «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства»,  
научный руководитель – Семёнов А.С., канд. физ.-мат. наук*

УДК 621.31

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**Егоров А.Н., Семёнов А.С., Харитонов Я.С.**

*Политехнический институт, филиал Северо-Восточного федерального университета  
им. М.К. Аммосова, Мирный, e-mail: kafeiagp@rambler.ru*

Научная работа посвящена исследованиям в области повышения эффективности применения различных систем регулируемого электропривода на промышленных предприятиях. Среди этих систем наиболее широкое распространение получил частотно-регулируемый электропривод. Предлагаемые в работе исследования направлены на формирование требований к процессу преобразования частоты, тока и напряжения электрической энергии с учетом технологических и эксплуатационных особенностей горно-технологического оборудования, а также электромагнитной совместимости, что является комплексным и новым подходом к развитию силовой преобразовательной техники, применяемой в горной промышленности. Исследования позволяют классифицировать горно-технологические установки с точки зрения применения оптимальной системы электропривода; классифицировать высоковольтные преобразователи частоты по их влиянию на показатели качества электрической энергии; разработать рекомендации по оптимальному выбору высоковольтных преобразователей частоты.

**Ключевые слова:** промышленное производство, технологический комплекс, частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, выпрямитель, инвертор, качество электроэнергии, энергоэффективность, ресурсосбережение

**DEVELOPMENT OF ACTIVITIES FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF HIGH-VOLTAGE FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE ON INDUSTRIAL ENTERPRISES**

**Egorov A.N., Semenov A.S., Kharitonov Y.S.**

*Polytechnic institute, branch of North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Mirny,  
e-mail: kafeiagp@rambler.ru*

The scientific work is devoted to research in the field of increasing the efficiency of the application of various systems of a regulated electric drive in industrial enterprises. Among these systems, the most widely used frequency-controlled electric drive. The researches proposed in the work are aimed at forming the requirements for the process of frequency conversion, current and voltage of electrical energy, taking into account technological and operational features of mining equipment, as well as electromagnetic compatibility, which is an integrated and new approach to the development of power conversion technology used in the mining industry. Research will allow to classify mining technological installations from the point of view of application of the optimum system of the electric drive; classify high-voltage frequency converters in terms of their effect on the quality of electrical energy; to develop recommendations for the optimal selection of high-voltage frequency converters.

**Keywords:** industrial production, technological complex, frequency-controlled electric drive, frequency converter, rectifier, inverter, power quality, energy efficiency, resource saving

Стремление обеспечить высокую энергоэффективность промышленных установок и технологических комплексов, а также необходимость обеспечения требуемых параметров технологических процессов явились катализатором развития и широкого применения систем регулируемого электропривода, среди которых наиболее широкое распространение получил частотно-регулируемый электропривод. Основой частотно-регулируемого электропривода являются полупроводниковые преобразователи частоты, бурное развитие которых на-

чалось в 80-е годы и связано с осознанием необходимости упрощения и повышения эффективности процесса регулируемого преобразования электрической энергии в механическую за счет построения системы электропривода на основе асинхронного двигателя. Асинхронные двигатели отличаются высокой надежностью, относительно невысокой стоимостью, хорошими эксплуатационными качествами, но устройства, обеспечивающие регулирование скорости вращения асинхронного двигателя до начала 80-х годов стоили дорого и не обладали

необходимыми для широкого внедрения в индустрию показателями.

Значительное увеличение инвестиций промышленную электронику привело к разработке принципиально новых, мощных полупроводниковых элементов, таких как IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором), GST (Gate Commutated Thyristor – запираемый тиристор), что в свою очередь стало основой развития промышленных преобразователей частоты и обусловило быстрый рост рынка преобразователей частоты.

Если первые преобразователи частоты рассматривались как чисто электротехнические устройства с определенным, стандартным набором функций по защите и управлению, то современные преобразователи частоты это высокотехнологичные устройства, функциональные возможности которой определяются программно-конфигурируемой системой управления и защиты. При этом сегодня на рынке представлено множество преобразователей частоты отечественного и зарубежного производства, которые отличаются функциональными возможностями. Эти отличия наряду с типом исполнения и качеством элементной базы обуславливают разницу стоимости между преобразователями, представленными на рынке. Поэтому при внедрении частотно-регулируемого электропривода уже на этапе выбора преобразователя частоты все усилия по повышению энергоэффективности или эффективности технологического процесса могут быть перечеркнуты из-за чрезмерных капитальных вложений или функционального несоответствия.

При выборе и внедрении системы электропривода следует учитывать ряд факторов, которые влияют на технико-экономические показатели обоснованности использования той или иной системы электропривода.

Так, например, на этапе пуско-наладочных работ параметры системы управления преобразователя частоты должны настраиваться таким образом, чтобы с одной стороны максимально обеспечить с заданными параметрами все режимы работы приводимой технологической установки, а с другой – надежную защиту узлов и элементов системы электропривода для предотвращения дорогостоящего и длительного ремонта. При этом на практике некоторые режимы работы технологических установок могут провоцировать выход из строя компонентов системы электропривода.

Также следует учитывать эксплуатационные особенности, так как большинство аварийных остановов и выходов из строя (до 30%) силовой преобразовательной техники происходит из-за несоответствия условий эксплуатации рекомендуемым разработчиком. К сожалению, на многих промышленных объектах горнодобывающей отрасли существует проблема обеспечения соответствующих условий эксплуатации. Так, например, в помещениях, где установлена преобразовательная техника, может попадать пыль и влага, содержащая токопроводящие химические элементы или в помещениях может не соблюдаться температурный режим, последнее приводит к постоянным остановам из-за срабатывания защиты от перегрева, а постоянный перегрев полупроводниковых элементов ускоряет процесс теплового пробоя полупроводников.

Отдельно стоит отметить проблемы превентивной диагностики и ремонта, так как на сегодняшний день при эксплуатации силовой преобразовательной техники на горных предприятиях сложилась практика обслуживания по текущему состоянию. Планово-предупредительные ремонты сводятся в основном к удалению грязи с узлов и элементов преобразователей. Превентивная диагностика и ремонт проводится только в отношении вспомогательных узлов и элементов, таких как вентиляторы охлаждения, фильтрующие элементы и др. Между тем, обслуживание по текущему состоянию допустимо для оборудования, работа которого не влияет на системы жизнеобеспечения персонала или простой которого не приводит к значительному недовыпуску продукции.

Значительный вклад в исследование вышеприведенных проблем внесен такими отечественными научными деятелями как Байков А.И., Грудинин В.С., Сбоев В.М., Лалетин В.И., Костюк В.А., Шагаров Д.А., Огудова Л.Н., Губанова Н.Б., Ушков А.С., Колганов А.Р., Храмшин В.Р., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н. и др. В их работах [1–7] освещены принципиальные вопросы выбора, внедрения и эксплуатации частотных преобразователей. Однако на сегодняшний день существует необходимость более детального изучения особенностей применения преобразователей частоты в конкретных условиях.

Цель и задачи научной работы. Цель работы – повышение эффективности применения частотно-регулируемого электро-

привода на промышленных объектах АК «АЛРОСА» (ПАО) за счет разработки и внедрения рекомендаций и методик по выбору, превентивной диагностике и ремонту преобразователей частоты в условиях горнодобывающих предприятий.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Анализ научно-технической литературы, нормативно-технической, проектной и технической документации по применяемым на промышленном предприятии высоковольтным преобразователям частоты.

2. Анализ особенностей промышленных установок, а также эксплуатационной специфики применения преобразователей частоты в условиях того или иного промышленного объекта.

3. Разработка методической рекомендации по выбору преобразователей частоты для технологических установок промышленных объектов.

4. Разработка методических рекомендаций по сбору, обработке и анализу статистических данных для превентивной диагностики преобразователей частоты технологических установок промышленных объектов предприятия.

5. Сбор, обработка, анализ и обобщение экспериментальных данных по преобразователям частоты технологических установок промышленных объектов.

6. Разработка методических рекомендаций по превентивной диагностике высоковольтных преобразователей технологических установок промышленных объектов того или иного промышленного предприятия.

**Результаты исследования.** При реализации работы будут использованы теоретические исследования фундаментальных основ и принципов процесса преобразования частоты, напряжения и тока электрической энергии переменного тока. Будут проводиться экспериментальные исследования с помощью современной приборной базы (тепловизоры, микроомметры, осциллографы и соответствующие программно-технические комплексы преобразователей частоты) режимов работы горно-технологического оборудования с частотно-регулируемым электроприводом на объектах горнодобывающих предприятий [8–12]. Инновационную составляющую обеспечит математическое моделирование режимов работы горно-технологического оборудования с частотно-регулируемым электроприводом в пакете программ MatLab, хорошо зарекомендовавшем себя в научных, инженерных и проектных

расчетах [13–19]. Подтверждение достоверности данных обеспечит инструментальный контроль показателей качества электроэнергии современными анализаторами типа Circutor AR6, Qualistar и Ресурс UF2M с целью определения фактического влияния работы высоковольтных преобразователей частоты на качество электроэнергии [20–30].

Основным результатом научной работы станет, как отмечалось ранее, разработка методических рекомендаций по превентивной диагностике высоковольтной частотно-регулируемой преобразовательной техники установок промышленных предприятий. Для реализации этих мероприятий был разработан план работ и обоснован состав научно-технического коллектива исполнителей работ. План работ содержит наименование и ориентировочные сроки проведения работ и рассчитан на 3 года.

Состав научного коллектива исполнителей должен охватывать много отраслей знаний и иметь различные возрастные категории. Компетенции, которыми должны обладать члены коллектива, должны позволить реализовать проект в указанные сроки.

Также для полноценной и своевременной реализации проекта необходимо обеспечить наличие современной материально-технической базы. Поможет в этом наличие специализированных учебно-научных лабораторий по промышленной автоматизации и частотному электроприводу и электромагнитной совместимости и качеству электрической энергии, а также их современное техническое оснащение анализаторами качества электрической энергии, измерителями показателей качества электрической энергии, тепловизором, цифровыми осциллографами, пирометрами, контактными термометрами и пр.

**Выводы и заключения.** В заключении стоит отметить, что реализация такого проекта позволит поэтапно повысить эффективность применения высоковольтных преобразователей на объектах промышленных предприятий. Так, первый этап проекта, нацеленный на разработку методических рекомендаций, которые позволяют сократить случаи необоснованного и некорректного выбора дорогостоящего оборудования – высоковольтных преобразователей частоты, позволит сэкономить предприятию десятки миллионов рублей уже в первый год реализации проекта.

#### Список литературы

1. Байков А.И. Особенности математического моделирования автоматизированного электропривода при анализе

качества преобразования электрической энергии // Промышленная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 2–7.

2. Грудинин В.С., Сбоев В.М., Лалетин В.И. Моделирование микропроцессорного управления частотным преобразователем асинхронного двигателя // Advanced Science. – 2017. – № 1. – С. 23.

3. Костюк В.А., Шагаров Д.А., Огудова Л.Н., Губанова Н.Б. Моделирование электромагнитных процессов в системе трехфазный автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель // Навигатор в мире науки и образования. – 2012. – № 4–7 (20–23). – С. 98.

4. Сагдатуллин А.М. Аналитическое исследование систем автоматизированного электропривода насосной станции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 89–99.

5. Ушков А.С., Колганов А.Р. Анализ энергоэффективности асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 6. – С. 74–79.

6. Храмыш В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 6. – С. 100–104.

7. Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н. Развитие метода компонентных цепей и разработка инструментальных средств автоматизированного моделирования элементов и систем электропривода // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». – 2004. – С. 126–128.

8. Егоров А.Н., Семенов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 86–93.

9. Матул Г.А., Семёнов А.С. К вопросу о комплексной автоматизации открытых горных работ в алмазодобывающей промышленности // Естественные и технические науки. – 2016. – № 12 (102). – С. 265–268.

10. Рушкин Е.И., Семёнов А.С., Саввинов П.В. Анализ применения протокола MODBUS для управления электроприводом на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–12. – С. 2615–2619.

11. Семёнов А.С. Определение нелинейных нагрузок в системе электроснабжения подземного рудника // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9–3. – С. 445–451.

12. Семёнов А.С., Шипулин В.С. Использование газоаналитических систем нового поколения для защиты рудника // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–3. – С. 480–484.

13. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 341–342.

14. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя при прямом пуске и с преобразователем частоты в пакете программ MATLAB // Естественные и технические науки. – 2013. – № 4 (66). – С. 296–298.

15. Семенов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MatLab // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Том 11, №1. – С. 51–59.

16. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы частотно-регулируемого

электропривода вентиляторной установки главного проветривания применительно к подземному руднику по добыче алмазосодержащих пород // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–5. – С. 1066–1070.

17. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Петрова М.Н. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–3. – С. 523–528.

18. Семенов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.

19. Шипулин В.С., Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 344–347.

20. Карташев И.И. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Н.М. Кузнецов, А.С. Семёнов. – М.: Изд-во Перо, 2013. – 142 с.

21. Кузнецов Н.М. Качество электрической энергии горных предприятий: монография / Н.М. Кузнецов, Ю.В. Бебихов, А.В. Самсонов, А.Н. Егоров, А.С. Семенов. – М.: Издательский дом «Академии Естествознания», 2012. – 68 с.

22. Кузнецов Н.М., Семенов А.С., Бебихов Ю.В., Рыбников А.В. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника // Горный журнал. – 2014. – №1. – С. 23–26.

23. Семёнов А.С., Бондарев В.А. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от преобразователя частоты // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4–1. – С. 112–117.

24. Семенов А.С., Бондарев В.А., Заголило С.А. Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжений // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9. – С. 86–92.

25. Семенов А.С., Кузнецов Н.М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике // Измерительная техника. – 2014. – №4. – С. 31–34.

26. Семёнов А.С., Матул Г.А., Хазиев Р.Р., Шевчук В.А., Черенков Н.С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–6. – С. 1210–1215.

27. Семенов А.С., Самсонов А.В., Бебихов Ю.В., Матул Г.А. Измерение и анализ показателей качества электрической энергии потребителей промышленных предприятий // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6 (84). – С. 480–485.

28. Семёнов А.С., Самсонов А.В., Матул Г.А., Черенков Н.С., Заголило С.А., Мартынова А.Б. Исследование качества электроэнергии при проведении энергоаудита учебного корпуса // Естественные и технические науки. – 2015. – № 10 (88). – С. 331–334.

29. Федоров О.В., Семенов А.С., Егоров А.Н., Хубиева В.М. Технико-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9–10. – С. 91–97.

30. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine // Measurement Techniques. – 2014. – V. 57, Issue 4. – P. 417–420.