

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
ВК «Кузбасская ярмарка»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 10 - 2024

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2024. - № 9. – 350 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоёмких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 4-7 июня 2024 г.).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

АВТОНОМНАЯ И ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕХНИКА НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ.....	188
¹ д.э.н. Никитенко С.М., ¹ к.т.н. Никитенко М.С., ¹ Худоногов Д.Ю., ¹ Кизиллов С.А., ² PhD Вайс И.	188
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	188
2 – EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH, Гельзенкирхен, Германия	188
СПОСОБ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИХ ФИЗИЧЕСКИМИ МАКЕТАМИ	193
¹ Кизиллов С.А., ¹ к.т.н. Никитенко М.С., ¹ Худоногов Д.Ю., ² Neogi B., ¹ Верховцев Д.О.....	193
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	193
2 – Инженерный колледж JIS, Кальяни, Западная Бенгалия, Индия.....	193
A COMPREHENSIVE REVIEW ON ADVANCING COAL MINING THROUGH INDUSTRY 4.0 AND INDO-RUSSIA COLLABORATION.....	198
Shaw H. K., Rajak A., Chanda A., Pal M., Neogi B.	198
JIS College of Engineering, Kalyani, West Bengal, India	198
ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПО ПЕРЕСЫПНОМУ УЗЛУ СТАКЕРА-РЕКЛАЙМЕРА	203
к.т.н. Клишин С.В., Морев А.Э., Тимофеев Т.Т.	203
АО «Моделирование и цифровые двойники», г. Москва, Россия	203
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY	209
к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А.....	209
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	209
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАБОТЫ КОНВЕРТЕРОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	213
Прохоров И. М., к.т.н. Турчанинов Е. Б., к.т.н. Шакиров М. К., д.т.н. Зимин А.В.....	213
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	213
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК НА КАЧЕСТВО ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАЙОНАХ УГЛЕДОБЫЧИ.....	217
¹ Стишенко К.П., ² Герасимук А.В., ¹ к.ф.-м.н. Хаимзон Б.Б., ¹ к.т.н. Кипервассер М.В.	217
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	217
2 – АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект», г. Новокузнецк, Россия	217
ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОВИДВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕХАНИЗМОВ В ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	222
Александров Н.А., Жданов Е.В., к.т.н. Кипервассер М.В.	222
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	222
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК.....	226
к.т.н. Поползин И.Ю.	226
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	226
ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	230
Жданов Е.В., Александров Н.А., к.т.н. Кубарев В.А.	230
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	230
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ	233
Петрущенко А.Ю.....	233
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	233
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ.....	238
к.т.н. Кузнецова Е.С., Богдановская Т.В., Игнатенко О.А.	238
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	238
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА МОЩНЫХ ИМПУЛЬСА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА	243
Кузнецова Е.С., Арбузов И.С.	243
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	243

Список литературы

1. Анучин А.С. Система управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 375. с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 272 с.
3. Выравнивание нагрузки с помощью преобразователей частоты Altivar 71. Руководство пользователя. – 18 с.
4. Руководство для Siemens Simovert Masterdrives Application Manual. – 942 с.
5. Белов М.П. Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов технологических комплексов: учебник для вузов. – М: Изд. Центр «Академия» 2007.
6. Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С. Контроль работоспособности конвейерного транспорта посредством регистрации параметров электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 3(97). – С. 101-105.

УДК 681.518.22+681.518.5: 621.313.333

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

к.т.н. Поползин И.Ю.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье приведены сведения об одном из перспективных способов модернизации асинхронного электропривода шахтных подъемных установок – применении схемы машины двойного питания. Актуальность вопроса обусловлена тем, что в большом числе подъемных электроприводов применены мощные асинхронные двигатели с фазным ротором и подключенной к нему роторной станцией, модернизация которых с использованием частотного управления не всегда возможна и сопряжена с рядом трудностей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, машина двойного питания, электропривод, подъемная установка, частотное управление.

С 1995 года на базе кафедры автоматизированного электропривода и промышленной электроники СибГИУ (с 2016 г. – кафедра электротехники, электропривода и промышленной электроники) и ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» проводятся НИОКР, направленные на разработку систем автоматизации, управления, защит и мониторинга для производственных объектов горно-металлургического комплекса Кузбасса и других регионов на российской элементной базе.

Существующие электроприводы на основе асинхронных электродвигателей с фазным ротором (например, применяемые на шахтных и рудничных подъемных установках) обычно построены по схеме с роторной станцией и ступенчатым переключением величины активного сопротивления в цепи ротора. В таких приводах значительная часть подведенной к двигателю энергии рассеивается в виде тепла на резисторах роторной станции, что существенно снижает их КПД и энергоэффективность. Также следует учитывать, что регулирование скорости машины с помощью переключения ступеней сопротивлений роторной станции из-за бросков тока, а, следовательно, и момента двигателя в момент переключения ступеней, ведет к возникновению значительных по величине динамических нагрузок в канатах и ударам в механической части привода, что отрицательно сказывается на надежности привода в целом. В то же время данная схема электропривода до сих пор находит достаточно широкое применение (в основном, в

существующих электроприводах подъемных установок, спроектированных до начала 2000х годов) благодаря своему главному достоинству – возможности регулирования скорости привода с неизменным критическим моментом, равным таковому для естественной механической характеристики приводного АД. Тем не менее, из-за указанных выше проблем с энергоэффективностью таких приводов весьма актуальна проблема их модернизации, при этом обычно необходимо сохранить приводной двигатель (многие из которых являются уникальными) и модернизировать только питающую часть электропривода и схему управления.

Общепринятым на сегодняшний день способом модернизации асинхронных электроприводов является использование схемы частотного электропривода с преобразователем частоты в цепи статора машины. Однако для подъемных двигателей большой мощности (сотни-тысячи кВт) это не всегда возможно из-за необходимости в применении силовых вентилях, способных на коммутацию значительных по величине токов при напряжении 6/10 кВ.

В этой связи перспективными представляются другие способы модернизации, учитывающие особенности АДФР. Так, каскадные схемы включения асинхронного двигателя [1] позволяют достигать существенного увеличения показателей энергоэффективности, однако для них характерны следующие недостатки:

- в асинхронно-вентильных каскадах (АВК) обычно используются преобразователи с одной управляемой (транзисторной или тиристорной) группой вентилях и неуправляемым диодным мостом, что не позволяет полностью управлять потоком мощности в электроприводе, в частности, осуществлять рекуперацию. Кроме того, это снижает достигаемый диапазон регулирования до 2-2,5:1, в то время как для подъемных двигателей данный диапазон должен составлять 30:1 и выше;

- машинные и машинно-вентильные каскады требуют установки в машинном зале установки дополнительной машины постоянного тока, что, как правило, невозможно. Кроме того, необходима организация питания цепи возбуждения этой машины, что требует дополнительной установки трансформатора, управляемого выпрямителя и системы регулирования возбуждения (или хотя бы защиты от обрыва поля).

Обеспечение приемлемых энергетических и регулировочных характеристик АДФР возможно при их использовании в режиме двойного питания [2]. Под машиной двойного питания (МДП), как правило, понимается схема включения АДФР, в которой к ротору двигателя подключен преобразователь частоты, построенный по схеме с промежуточным звеном постоянного тока. В качестве силовых вентилях для такого преобразователя в настоящее время используются силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Электропривод, силовая часть которого построена по данной схеме, обладает следующими конструктивными особенностями [3]:

- статор двигателя запитан непосредственно от сети либо от частотного преобразователя;
- ротор двигателя запитан от управляемого преобразователя частоты;
- управление скоростью и моментом двигателя осуществляется за счет управления амплитудой, фазой и частотой добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора, с выхода преобразователя частоты.

Функциональная схема электропривода на основе МДП, разработанного ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» и кафедрой ЭЭиПЭ СибГИУ, приведена на рис. 1. На схеме приняты следующие условные обозначения: *М* – асинхронный двигатель с фазным ротором; *Тр* – трансформатор; *БУРГ* – блок управления вентильной группой, синхронизированной с ротором; *БУСГ* – блок управления вентильной группой, синхронизированной с сетью; *БСВГ* – блок синхронизации вентильных групп; *БУТР* – блок управления током ротора; *ИУС* – информационно-управляющая система; *К1, К2* – коммутационное устройство,

осуществляющее подключение к цепи ротора управляемого преобразователя напряжения (УПН) или управляемого преобразователя тока (УПТ) [4].

Приведенная схема в соответствии с разработанным алгоритмом функционирования [6] работает следующим образом:

1) В режиме пуска при заторможенном роторе *K1* разомкнут, *K2* замкнут, в цепь ротора включен управляемый преобразователь тока (УПТ), формирующий в цепи ротора плавно нарастающий ток, который увеличивается, пока момент машины не станет равным статическому моменту на валу. При равенстве момента машины статическому моменту снимается тормоз. Реализация такого режима растормаживания позволит избежать рывка подъемного сосуда вверх или его провала вниз при снятии тормоза.

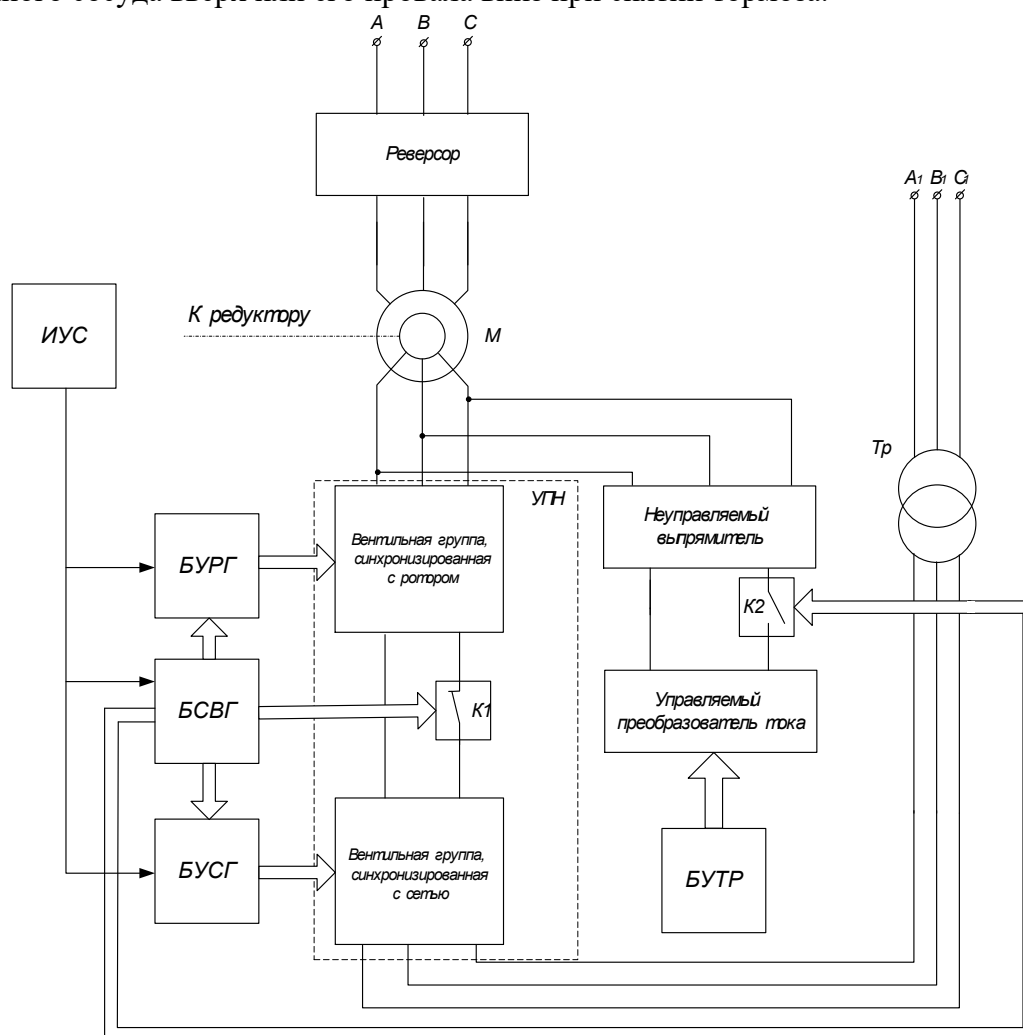


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с асинхронным электродвигателем двойного питания

2) После снятия механического тормоза ток в цепи УПТ уменьшается, и машина начинает плавно разгоняться под действием динамического момента. При выходе на заданную скорость (принимаемую $0,1\omega_0$) необходимо отключить от цепи ротора УПТ и подключить УПН. Для этого «сетевая» группа вентилях переводится в выпрямительный режим, а «роторная» – в инверторный. Частота напряжения на выходе роторной группы устанавливается равной текущей частоте ЭДС ротора, определяемой по величине текущего скольжения; амплитуда устанавливается на уровне, определяемом желаемым темпом увеличения скорости; фазовый сдвиг между напряжением на статоре и добавочным напряжением – на уровне, обеспечивающем требуемую перегрузочную способность МДП. По достижении заданной пороговой скорости, определяемой по тахограмме установки, $K2$ размыкается, $K1$ замыкается.

3) После подключения к ротору УПН амплитуда и частота напряжения на выходе ПЧ ротора непрерывно уменьшаются с уменьшением скольжения; при этом машина разгоняется до заданной скорости (если заданная скорость равна номинальной, то амплитуда напряжения на роторе уменьшается до 0). Машина выходит на заданную тахограммой подъемной установки скорость.

4) При начале замедления амплитуда напряжения на роторе начинает увеличиваться, машина начинает замедляться, частота добавочного напряжения на роторе равна частоте собственной ЭДС ротора и изменяется вместе со скольжением.

5) После достижения машиной скорости $0,5\omega_n$ машина переводится в режим частотной коррекции [5]. Замедление в таком режиме возможно до полного останова машины и наложения механического тормоза.

Выводы. Особенности разработанного электропривода заключаются в следующем.

Система автоматического регулирования скорости осуществляет управление скоростью и моментом двигателя за счет регулирования амплитуды, фазы и частоты добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора асинхронного двигателя, при этом достигим диапазон регулирования скорости 40:1 с сохранением требуемой перегрузочной способности, возможно регулирование потребляемой приводом реактивной мощности.

В двигательном режиме работы мощность скольжения АДФР через преобразователь частоты возвращается в питающую сеть, что обеспечивает существенную экономию электроэнергии.

Управление фазовым сдвигом добавочного напряжения в цепи ротора позволяет управлять фазовым сдвигом тока ротора относительно напряжения на статоре, что дает возможность вводить машину в режим генераторного торможения при скорости ниже синхронной с рекуперацией энергии в сеть.

Разработанная система электропривода может быть интегрирована в управляюще-вычислительный комплекс автоматизированного электропривода, разработанный ООО «НИИ АЭМ СибГИУ».

Существенным отличием данной схемы от существующих на данный момент решений [7, 8] является комбинированное управление УПН и УПТ с возможностью управления амплитудой, фазой и частотой добавочной ЭДС в цепи ротора. При этом частота ЭДС может задаваться как независимо, так и в функции скорости вращения ротора, что позволяет организовать работу машины как в синхронном, так и в асинхронном режиме с сохранением перегрузочной способности на всем диапазоне регулирования скорости. Экономия электрической энергии при этом составляет до 30% по сравнению со схемой электропривода с роторной станцией. При использовании предлагаемой схемы электропривода также повышается надежность электропривода за счет устранения динамических перегрузок в механической части.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б. Асинхронный вентильный каскад. – М. : Энергия, 1967. – 152 с.
2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 363 с.
3. Поползин И.Ю. Электропривод подъемной установки с комбинированным управлением на основе машины двойного питания // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – №1 (165). – С. 18-23. – DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23
4. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островляничик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С. 40 – 46.
5. Ostrovlyanchik V.Y., Popolzin I.Yu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. – 012041. – 9 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.

6. Ostrovlyanchik VYu., Popolzin I.Yu., Kubarev V.A. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly-fed machine with combined control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – P. 1–9 (012040). – DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012040.

7. Иванцов В. В. Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода «ЭРАТОН-ФР» – ЗАО «ЭРАСИБ», 2011. – URL : <https://erasib.ru/staty/hoist-eratonfr-efficiency/>

8. Бежок В.Р. Шахтный подъем ; под общ. ред. Б.А. Грядущего и В.А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.

УДК 621.316.13

ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Жданов Е.В., Александров Н.А., к.т.н. Кубарев В.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено влияние различных типов провалов напряжения по продолжительности и напряжению на работу частотных преобразователей в горно-металлургической промышленности.

Ключевые слова: частотный преобразователь, провал напряжения, горно-металлургическая промышленность.

Горно-металлургические предприятия в последние годы активно повышают степень автоматизации производства: всё большее количество систем и механизмов модернизируются и оснащаются современными устройствами силовой электроники (частотные преобразователи, преобразователи постоянного тока, устройства плавного пуска и т.п.) и микропроцессорной техники (промышленные контроллеры, системы телемеханики, устройства релейной защиты и автоматики и т.п.). Перечисленные устройства обладают повышенными требованиями к качеству питающей электроэнергии и электромагнитной совместимости. В силу конструктивных и схемных особенностей данные потребители электрической энергии чувствительны к кратковременным нарушениям электроснабжения, называемыми провалами напряжения, длительностью порядка десятых долей секунды. Системы автоматического включения резерва и автоматического повторного включения срабатывают на временных интервалах порядка нескольких секунд. По этой причине может нарушаться работа чувствительных потребителей электроэнергии, что может вызывать сбои в работе технологических агрегатов с высокой степенью автоматизации.

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки. Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. Длительность провала напряжения может быть до 1 минуты. В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания