

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2023**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

12-14 декабря 2023 г.

**Новокузнецк
2023**

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, к.т.н., доц. В.А. Кубарев,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2023: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 12-14 декабря 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 420 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

8. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения/Издание официальное. Москва, 2014.

УДК [62-83+621.313.333.1]:622.6

ЭЛЕКТРОПРИВОД С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Поползин И.Ю., Кубарев В.А.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, eidoline@yandex.ru

Аннотация. 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.

Abstract. The article provides information about one of the promising ways to modernize the asynchronous electric drive of mine hoisting installations - the use of a doubly-fed motor circuit. The relevance of the issue is due to the fact that a large number of lifting electric drives use powerful asynchronous motors with a wound rotor and a rotor station connected to it, the modernization of which using frequency control is not always possible and is associated with a number of difficulties.

Keywords: induction motor with wound rotor, doubly-fed motor, electric drive, lifting unit, frequency control.

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 (до 30%) бесполезно рассеивается в виде тепла на резисторах роторной станции, что существенно снижает их КПД и энергоэффективность. Кроме того, регулирование скорости машины с помощью переключения сопротивлений в роторной станции ведет к возникновению динамических перегрузок в канатах, рывкам и ударам в механической части привода (из-за бросков тока, а, следовательно, и момента двигателя в момент переключения ступеней), что негативно сказывается, к примеру, на долговечности зубчатых колес в редукторах или подъемных канатов. В то же время данная схема привода до сих пор очень широко применяется 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 указанной выше проблемы с низким КПД таких приводов весьма актуальна проблема модернизации таких приводов, при этом обычно существует необходимость в сохранении самого приводного двигателя и модернизации только питающей части электропривода и схемы управления.

Стандартным на сегодняшний день способом модернизации асинхронных электроприводов является использование схемы частотного электропривода с преобразовате-

лем частоты в цепи статора машины. Однако для мощных (например, подъемных) асинхронных двигателей это не всегда возможно из-за необходимости в применении силовых вентилях, способных на коммутацию значительных токов при высоком (6 кВ) напряжении.

В этой связи перспективными видятся другие способы модернизации, учитывающие особенности АДФР. Так, каскадные схемы включения асинхронного двигателя [1] позволяют достигать большей энергоэффективности. Однако, им присущи следующие недостатки:

- в асинхронно-вентильных каскадах (АВК) используются преобразователи с одной управляемой группой вентилях, что не позволяет полностью управлять потоком мощности машины и осуществлять рекуперацию энергии в сеть;

- в АВК из-за неполной управляемости преобразователя невозможно достичь тормозных режимов работы машины (кроме динамического торможения). Кроме того, это снижает достигаемый диапазон регулирования до 2-2,5:1;

- машинные и машинно-вентильные каскады требуют установки дополнительной машины постоянного тока, что, как правило, невозможно.

Для обеспечения приемлемых энергетических и регулировочных характеристик двигателей с фазным ротором возможно использовать их в режиме двойного питания [2]. Под машиной двойного питания (МДП) будем понимать схему включения АДФР, в которой к ротору двигателя подключен преобразователь частоты с полностью управляемыми вентильными группами на основе IGBT.

Особенности асинхронного электропривода, построенного по схеме МДП [3]:

- статор двигателя запитан непосредственно от сети либо от частотного преобразователя;

- ротор двигателя запитан от управляемого преобразователя частоты с полностью управляемыми вентильными группами

- управление координатами двигателя осуществляется за счет управления амплитудой, фазой и частотой добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора.

Схема электропривода на основе МДП приведена на рисунке 1. Приняты следующие условные обозначения: *M* – асинхронный двигатель с фазным ротором; *Tr* – трансформатор; *БУРП* – блок управления преобразователем, синхронизированным с ротором; *БУСП* – блок управления преобразователем, синхронизированным с сетью; *БСП* – блок синхронизации преобразователей; *БУН* – блок управления нагрузкой; *ИУС* – информационно-управляющая система; *K1, K2* – коммутационное устройство, осуществляющее подключение к цепи ротора управляемого преобразователя напряжения (УПН) или управляемого преобразователя тока (УПТ) [4].

Приведенная схема в соответствии с разработанным авторами алгоритмом функционирования работает следующим образом:

- 1) при заторможенном роторе *K1* разомкнут, на ротор не подается добавочного напряжения. *K2* замкнут, в цепь ротора включен управляемый преобразователь тока (УПТ). Ток увеличивается до тех пор, пока момент машины не станет равным статическому моменту;

- 2) при равенстве момента машины статическому моменту снимается тормоз. После снятия механического тормоза ток в цепи УПТ уменьшается, и машина начинает разгоняться. При выходе на заданную скорость ($0,1\omega_0$) необходимо отключить от цепи ротора УПТ и подключить УПН. Для этого сетевой ПЧ переводится в выпрямительный режим, роторный ПЧ – в инверторный, частота напряжения на выходе роторного ПЧ устанавливается равной текущей частоте ЭДС ротора, амплитуда устанавливается на требуемом значении. По достижении заданной пороговой скорости *K2* размыкается, *K1* замыкается;

- 3) амплитуда напряжения на выходе ПЧ ротора непрерывно уменьшается; частота уменьшается, при этом машина разгоняется до заданной скорости;

4) при начале замедления амплитуда напряжения на роторе начинает увеличиваться, машина начинает замедляться, частота добавочного напряжения на роторе равна частоте собственной ЭДС ротора;

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.

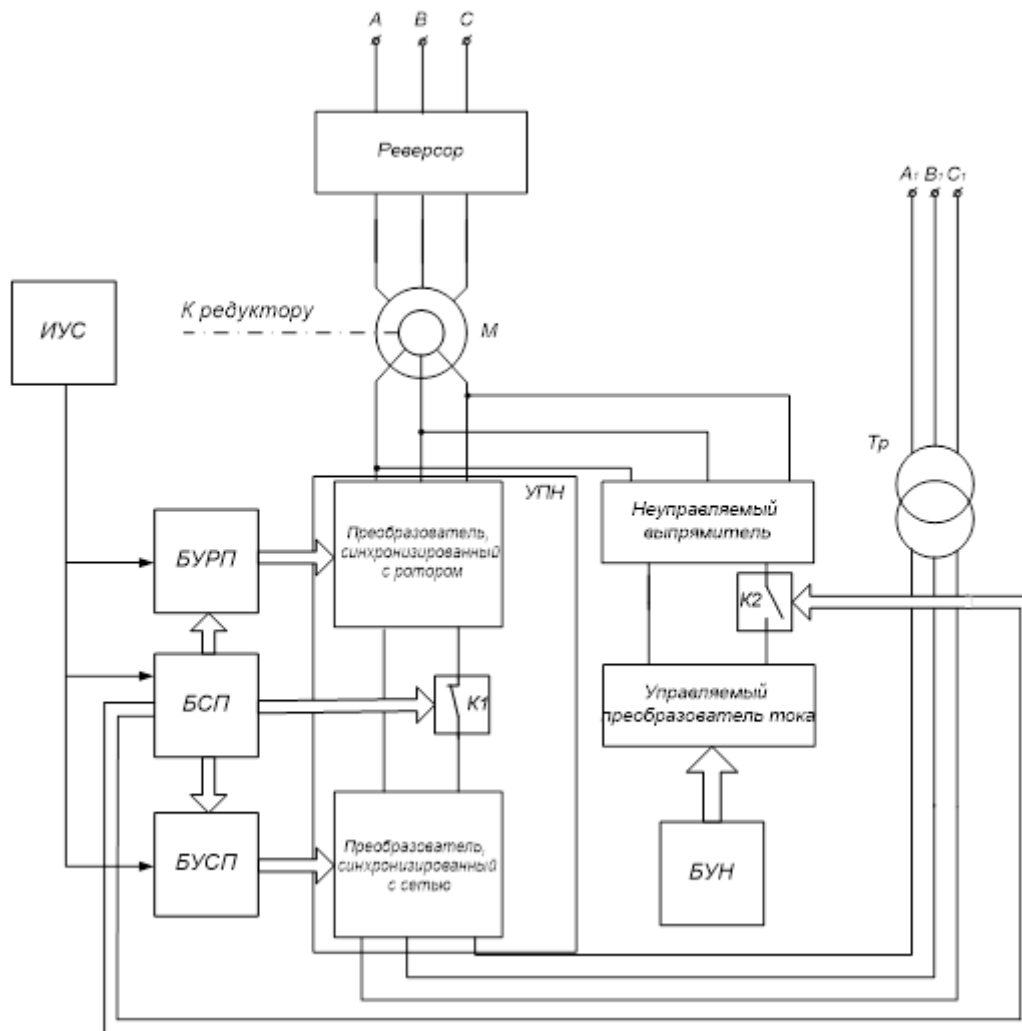


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода с асинхронным электродвигателем двойного питания

Особенности описываемого электропривода:

– адаптивная 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;

– достижим большой (до 40:1) диапазон регулирования скорости машины с сохранением требуемой перегрузочной способности, возможно регулирование потребляемой приводом реактивной мощности;

– в двигательном режиме работы машины со скоростью ниже синхронной часть потребляемой асинхронным электродвигателем мощности через преобразователь частоты возвращается в питающую сеть, что обеспечивает значительную экономию электроэнергии;

– управление фазой добавочной ЭДС в цепи ротора позволяет управлять фазой тока ротора, что дает возможность вводить машину в режим генераторного торможения при скорости ниже синхронной с рекуперацией энергии в сеть;

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

Существенным отличием данной схемы от существующих на данный момент решений [6-11] 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 безопасность и надежность электропривода.

Библиографический список

1. Онищенко, Г.Б. Асинхронный вентильный каскад / Г.Б. Онищенко / М. : Энергия, 1967. – 152 с.
2. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик / Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 363 с.
3. Поползин, И.Ю. Электропривод подъемной установки с комбинированным управлением на основе машины двойного питания / И. Ю. Поползин // 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. Островлянчик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев, А.В. Толстых, А.В. Дроздова // 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. 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/hoisteratonfr-efficiency/>
7. Шахтный подъем / В.Р. Бежок, В.И. Дворников, И.Г. Манец, В.А. Пристром; под общ. ред. Б.А. Грядущего и В.А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624с.
8. Долганов А.В. Стационарные машины / А.В. Долганов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 281 с.
9. Руководство по ревизии и наладке шахтных подъемных установок / В.Р. Бежок, В.Г. Калинин, В.Д. Коноплянов, Е.М. Курченко; под общ. ред. В.А. Корсуна. – Донецк : Донеччина, 2009. – 672 с.
10. Хватов С.В. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада / С.В. Хватов, В.Г. Титов. – Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1977. – 91 с.
11. Pena R. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation / R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher // IEE Proceedings – Electric Power Applications, 1996. – Vol. 143. – Iss. 3. – P. 231 – 241.

лекарственных препаратов на примере Кемеровской области - Кузбасса за 2021 - 2022 годы.....	279
<i>Поповян Н.О., Усов А.Б.</i>	
Информационно-аналитическая система управления деятельностью предприятия по производству асфальта и асфальтобетонной смеси	284
<i>Грачев А.В.</i>	
Подходы к оцениванию работы узлов в распределенной сетевой структуре для задач управления техническими элементами.....	291
<i>Рыленков Д.А., Калашников С.Н.</i>	
Управление конфигурациями телекоммуникационного оборудования при решении задач обеспечения информационной безопасности.....	294
<i>Лубина О.С., Калашников С.Н.</i>	
Разработка теоретических основ для управления образовательным процессом при изучении учебных дисциплин математического цикла с использованием технологий виртуальной и дополненной реальностей	297
<i>Шабалин В.С., Киселева Т.В.</i>	
Обзор существующих методов и инструментов управления организацией	300
СЕКЦИЯ 4. СОВРЕМЕННЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Поползин И.Ю.</i>	
К вопросу о применении электропривода, построенного по схеме машины двойного питания, для механизмов с большими диапазонами регулирования скорости (на примере подъемной установки).....	306
<i>Дурнев А.А., Симаков В.П., Кипервассер М.В.</i>	
Применение сглаживающих фильтров для преобразователей приводов рольгангов металлургических производств с целью снижения генерации высших гармоник в питающую сеть.....	311
<i>Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., Кипервассер М.В.</i>	
Особенности модели фазосдвигающего трансформатора Zigzag Phase-Shifting Transformer в среде Matlab Simulink при моделировании силовых трансформаторов 10(6)/0,4 со схемой соединения обмоток Y/Zn-11	314
<i>Васенин А.Б., Крюков О.В.</i>	
Система мониторинга автоматизированного электропривода	318
<i>Степанов С.Е., Крюков О.В.</i>	
Переходные процессы короткого замыкания в электроприводе	324
<i>Стищенко К.П., Герасимук А.В., Кипервассер М.В.</i>	
Влияния высших гармонических составляющих в питающем напряжении тяговой подстанции на качество выпрямленного напряжения и напряжения на шинах 10/6 кВ	330
<i>Поползин И.Ю., Кубарев В.А.</i>	
Электропривод с асинхронным электродвигателем двойного питания.....	335
<i>Кубарев В.А., Зайцев Н.С., Кузнецова Е.С.</i>	
Математическое моделирование синхронного двигателя с демпферной обмоткой в системе относительных единиц «Парка-Горева».....	339