

**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

СЕКЦИЯ 4. СОВРЕМЕННЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК [621.313.333.1+621.313.323]:622.23.05

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ, ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ С БОЛЬШИМИ ДИАПАЗОНАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ)

Поползин И.Ю.

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

Аннотация. Приведены сведения об одном из способов построения асинхронного электропривода – применении схемы машины двойного питания на примере электропривода шахтной подъемной установки. Актуальность вопроса связана с тем, что, как правило, на подъемных электроприводах с асинхронными двигателями с фазным ротором применяется устаревшая схема с роторной станцией сопротивлений, обладающая низкой энергоэффективностью и не позволяющая осуществлять плавное регулирование скорости привода. Модернизация таких приводов с использованием частотного управления не всегда возможна и сопряжена с рядом трудностей – так, например, частотные преобразователи большой мощности с выходным напряжением 6 кВ обладают существенными массогабаритными показателями и высокой стоимостью и, кроме того, часто магнитная система приводных двигателей не рассчитана на применение частотного управления. В этой связи применение схемы машины двойного питания является перспективным способом модернизации подобных приводов.

Ключевые слова: подъемная установка, асинхронный двигатель с фазным ротором, машина двойного питания, преобразователь частоты.

Abstract. The article provides information about one of the methods for constructing an asynchronous electric drive - the use of a doubly-fed machine using the example of an electric drive for a mine hoisting installation. The relevance of the issue is due to the fact that, as a rule, lifting electric drives with asynchronous motors with a wound rotor use an outdated circuit with a rotor resistance station, which has low energy efficiency and does not allow smooth control of the drive speed. Modernization of such drives using frequency control is not always possible and is associated with a number of difficulties - for example, high-power frequency converters with an output voltage of 6 kV have significant weight and size characteristics and high cost, and, in addition, often the magnetic system of drive motors is not designed for use frequency control. In this regard, the use of a dual-power machine circuit is a promising way to modernize such drives.

Keywords: lifting installation, wound-rotor induction motor, doubly-fed induction machine, frequency converter.

В электроприводе шахтных и рудничных подъемных установок (ПУ) до сих пор достаточно широкое применение находит схема на основе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) и роторной станцией [1-3]. Такая схема обладает низкой энергоэффективностью (по разным оценкам, до 30% энергии, подведенной к двигателю, бесполезно рассеивается на резисторах). Кроме того, ступенчатое переключение сопротивлений вызывает ступенчатое изменение тока ротора машины, и, как следствие, броски вращающего момента двигателя, которые передаются в механическую часть привода и весьма негативно влияют на подъемные канаты и зубчатые передачи (например, в редукторах). Тем не менее, в такой схеме обеспечивается большой пусковой момент двигателя (могущий теоретически достигать величины критического момента) и сохраняется перегрузочная способность АДФР на всем диапазоне регулирования скорости, может составлять 30-40:1. Однако в силу того, что к современному электрооборудованию и, в частности, к электроприводам предъявляются высокие требования по энергоэффективности, эту схему следует признать морально устаревшей и не удовлетворяющей современным условиям. Таким образом, возникает вопрос о том, как модернизировать такие приводы.

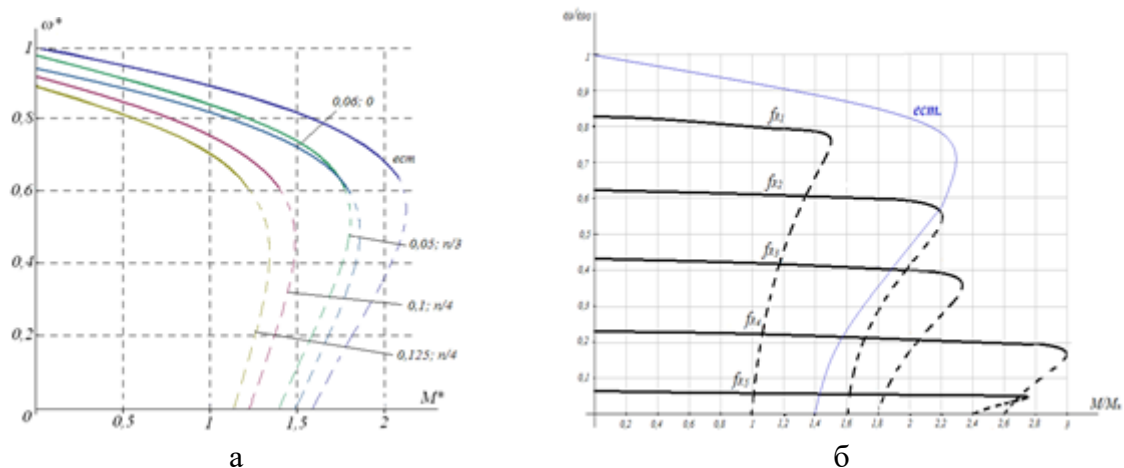
«Классическим» и наиболее распространенным в настоящее время способом модернизации асинхронного привода является использование частотного управления, при котором к статору двигателя подключается преобразователь частоты, а ротор АДФР закорачивается. Однако при такой модернизации мощных электроприводов с АДФР (в частности, приводов подъемных установок) неизбежно возникают проблемы. Во-первых, в таких приводах используются мощные двигатели с высоким напряжением на статоре (типовым следует считать 6 кВ) и мощностью порядка сотен и тысяч кВт (что обуславливает также существенные величины токов в обмотках статора таких машин). Частотные преобразователи с силовыми вентилями, рассчитанными на такие напряжения и токи, обладают большими массогабаритными показателями, высокой стоимостью и сравнительно низкой надежностью из-за крайне тяжелых режимов работы полупроводниковых вентилях – чрезвычайно высокого нагрева (им требуется принудительное жидкостное охлаждение) и больших величин противо-ЭДС при коммутации. Более того, в некоторых случаях для особо мощных приводов подобрать частотный преобразователь для АДФР попросту невозможно из-за отсутствия на рынке таковых с нужными параметрами.

В этой связи перспективным может представляться иное направление модернизации таких электроприводов – включение АДФР по схеме машины двойного питания (МДП) [4]. При этом к ротору машины подключается преобразователь частоты с полностью управляемыми вентильными группами, позволяющий подавать в цепь ротора двигателя добавочное напряжение с регулируемой частотой, амплитудой и фазой [5-7]. Обычно считается, что диапазон изменения скорости АДФР в схеме МДП ограничен соотношением 2-2,5:1 [5, 7], что недостаточно для электропривода ПУ, диапазон изменения скорости в которых, как было сказано выше, может достигать 40:1. Таким образом, для применения схемы МДП в электроприводе ПУ и других подобных электроприводах необходимо решение задачи расширения диапазона регулирования скорости МДП.

Регулирование скорости и момента МДП осуществляется изменением параметров добавочного напряжения на роторе машины (амплитуды, фазы и частоты). Согласно [1, 8], для МДП выделяются два основных режима работы, зависящих от способа управления частотой добавочного напряжения. Первый режим, асинхронный, возникает в случае, когда частота добавочного напряжения равна частоте собственной ЭДС ротора. Второй режим, называемый «синхронным», возникает в случае, если частота добавочного напряжения на роторе не равна частоте скольжения. Вид механических характеристик машины в асинхронном режиме показан на рисунке 1а, в синхронном – на рисунке 1б.; цифрами на рисунке показаны относительная величина напряжения на роторе и его фазовый сдвиг относительно напряжения на статоре машины.

При этом исследования [8] показали, что в асинхронном режиме вид механических характеристик МДП схож с таковыми для АДФР, скорость и момент машины зависят, в основном, от амплитуды, а фазовый сдвиг определяет жесткость рабочего участка характеристики. В синхронном режиме механическая характеристика МДП подобна таковой для явнополюсного синхронного двигателя и имеет жесткость, близкую к бесконечности, а значения амплитуды и фазового сдвига определяют максимальную перегрузочную способность МДП и потребляемую ей реактивную мощность.

По характеристикам видно, что в асинхронном режиме при увеличении амплитуды добавочного напряжения на роторе уменьшается жесткость рабочего участка механической характеристики машины и ее перегрузочная способность. В асинхронном режиме диапазон регулирования скорости вниз от номинальной ограничен падением перегрузочной способности машины; в синхронном режиме регулирование целесообразно в диапазоне скоростей $0-0,5\omega_n$, поскольку в этом диапазоне скоростей машины имеет наибольшую перегрузочную способность (рисунок 1б).



а – в асинхронном режиме; б – в синхронном

Рисунок 1 – Механические характеристики МДП

Исходя из вышеизложенного можно прийти к выводу о том, что для достижения требуемого для ПУ диапазона регулирования скорости может использоваться комбинация асинхронного и синхронного режимов. Однако ни один из этих режимов не позволяет реализовать такой характерный для подъемных установок режим как растормаживание привода (снятие механического тормоза с барабана ПУ в начале движения, характеризующееся необходимостью создавать номинальный момент на валу двигателя при нулевой скорости) [9], поскольку перегрузочная способность МДП на малых скоростях в асинхронном режиме слишком мала, а в синхронном режиме при нулевой скорости МДП вообще не развивает пускового момента. Для решения этой проблемы было предложено включение в цепь ротора управляемого преобразователя тока (УПТ) [9], который позволяет осуществить плавный пуск подъемного двигателя за счет прямого управления током ротора и достижение за счет этого скорости, на которой можно использовать синхронный режим. В зависимости от пределов регулирования частоты добавочного напряжения на роторе, диапазон регулирования скорости МДП при комбинации асинхронного и синхронного режимов работы машины с параметрическим регулированием с помощью УПТ может быть оценен как не менее 30:1, что является вполне удовлетворительным значением.

При использовании описанного способа управления рабочие зоны механических характеристик МДП в различных режимах имеют вид, приведенный на рисунке 2.

Стрелками на рисунке 2 показаны переходы между механическими характеристиками для разных скоростей. При торможении увеличением амплитуды добавочного напряжения в асинхронном режиме текущая скорость оказывается выше скорости идеального холостого хода на новой характеристике. При этом рабочая точка ω_n смещается во второй квадрант (точка ω'_n), и привод тормозится в режиме рекуперации. Под действием тормозного момента скорость машины уменьшается до заданной скорости ω_1 . Разгон машины в асинхронном режиме осуществляется по такому же принципу. В синхронном режиме при увеличении частоты и амплитуды добавочного напряжения уменьшается момент привода, и происходит торможение машины до заданной скорости по траектории $\omega_4 - \omega'_4 - \omega_5$. В режиме УПТ за счет прямого управления током ротора достигим любой требуемый момент.

Упрощенная принципиальная электрическая схема электропривода, реализующего такое управление, показана на рисунке 3.

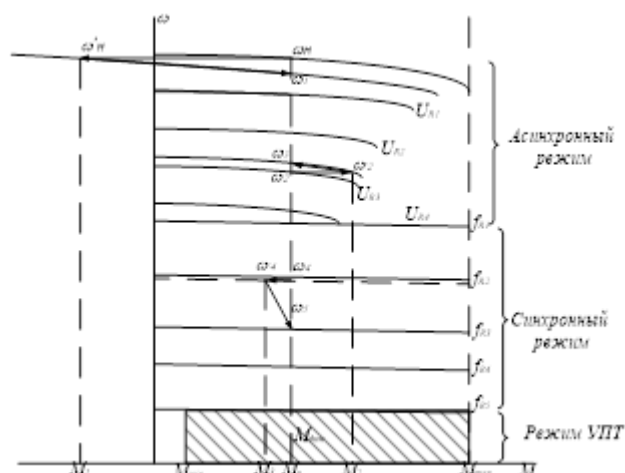


Рисунок 2 – Рабочие зоны механических характеристик МДП при комбинации режимов

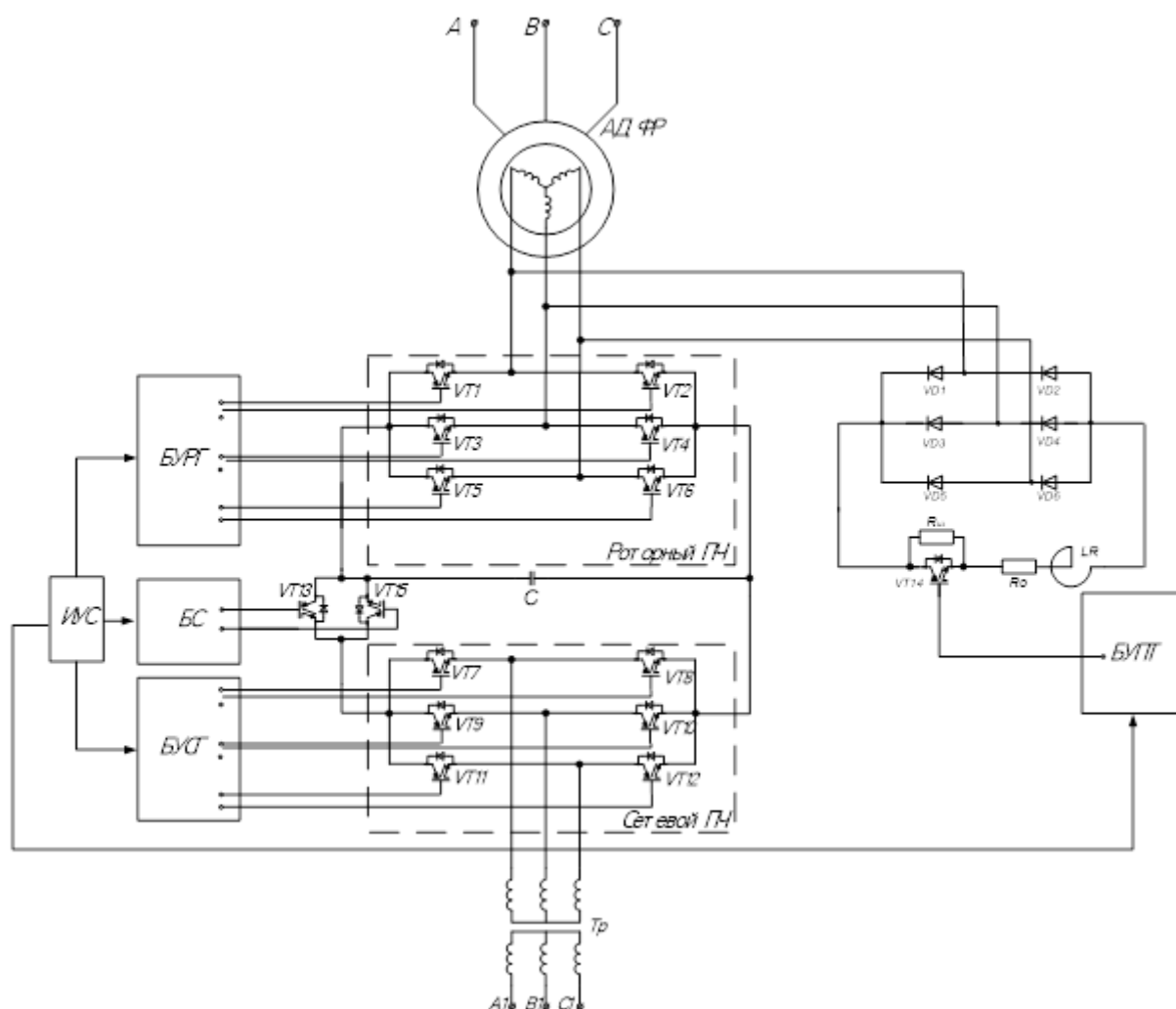


Рисунок 3 – Схема электропривода на основе МДП с комбинированным управлением

На рисунке 3 использованы следующие обозначения: VT1-VT15 – силовые ключи (IGBT); A-B-C – трехфазная сеть, к которой подключен статор МДП; A1-B1-C1 – сеть, питающая преобразователь в цепи ротора (для большинства случаев это та же сеть A-B-C); C – накопительный конденсатор в цепи постоянного тока преобразователя; VD1-VD6 – выпрямительные диоды в цепи УПТ; Rш – шунтирующий резистор; R₀ – токоограничи-

вающий резистор; LR – сглаживающий реактор; БУРГ – блок управления роторной группой вентиляей; БУСГ – блок управления сетевой группой вентиляей; БС – блок синхронизации; БУПТ – блок управления преобразователем постоянного тока.

Таким образом, описанная схема электропривода ПУ технически реализуется на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, двух преобразователей (тока и напряжения) и системы управления преобразователями. В такой схеме преобразователи имеют установленную мощность (а, следовательно, габариты и цену), существенно меньшую, чем мощность частотного преобразователя в цепи статора для такого же двигателя. При этом полностью управляемые вентиляльные группы позволяют рекуперировать энергию в цепи ротора (как в тормозных, так и в двигательном режимах), и управлять реактивной составляющей тока ротора, что позволяет снижать потребляемую двигателем реактивную мощность [2, 10, 11]. При этом наличие в схеме двух независимых друг от друга преобразователей обеспечивает резервирование – в случае выхода из строя одного из них движение подъемного сосуда может быть безопасно продолжено с помощью другого, хотя и с меньшей скоростью.

Библиографический список

1. Долганов А.В. Стационарные машины / А.В. Долганов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 281 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Онищенко Г.Б. Асинхронные вентиляльные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2006. 363 с.
7. Хватов С.В. Проектирование и расчет асинхронного вентиляльного каскада / С.В. Хватов, В.Г. Титов. – Горький: ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1977. – 91 с.
8. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I. Yu., Marshev D.A. Mechanical characteristics of the doubly-fed machine and its use in the hoist electric drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 206. DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012028
9. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островляничик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев, А.В. Толстых, А.В. Дроздова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С.
10. 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.
11. Понкратов А.С. Использование машины двойного питания в качестве генератора переменного тока / А.С. Понкратов, Д.Н. Мирошник // Инновационные перспективы Донбасса: материалы международной научно-практической конференции, г. Донецк, 20 – 22 мая 2015 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2015. – С. 12 – 21.

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., Калашиников С.Н.</i>	
Управление конфигурациями телекоммуникационного оборудования при решении задач обеспечения информационной безопасности.....	294
<i>Лубина О.С., Калашиников 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