

статья подготовлена **В. Кривояз,**  
 Е. Бородацкий, В. Маевский,  
 О. Маньлов, А. Ткачук,  
 С. Шилин, ЗАО «Автоматизи-  
 зированные системы и  
 комплекссы», г. Екатеринбург

# Полупроводниковые преобразователи для современных энергоэффективных технологий

Все возрастающие требования к энергоэффективности электроприводов обуславливают актуальность работ по внедрению в промышленность современных полупроводниковых преобразователей, обеспечивающих, наряду с высокими техническими характеристиками, минимизацию энергопотребления, электромагнитную совместимость с питающей сетью. На предприятии ЗАО «Автоматизированные системы и комплекссы» (АСК) разработан и внедрен ряд систем полупроводниковых преобразователей для электроприводов, реализующих разные подходы к решению задачи энергоэффективности:

1. Преобразователи частоты (ПЧ) с накопителями электроэнергии для городского электротранспорта.
2. Рекуперирующие преобразователи частоты для рудничных самоходных вагонов.
3. Высоковольтные преобразователи напряжения (ТПН).
4. Групповые источники питания пониженной частоты.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ (ПЧ) С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Электропитание современных систем городского транспорта основано на подключения к сети электроснабжения с помощью контактных проводов (провода) и токосъемников различных конструкций. Основным недостатком указанных вариантов являются:

- большие капитальные затраты;
- низкая надежность вследствие обрывов в сети, просадок напряжения;
- дополнительные потери электроэнергии при большой протяженности линий снабжения;
- необходимость завышения установленных

В данной статье приводится обзор полупроводниковых преобразователей электрической энергии, реализующих различные подходы энергоэффективного управления промышленными установками и транспортными комплексами. Преобразователи разработаны и изготавливаются на предприятии ЗАО «Автоматизированные системы и комплекссы».



Рисунок 1. Внешний вид трамвая модели 71-405-11 с комбинированным питанием.

мощностей электрических подстанций для обеспечения работоспособности в условиях пиковых перегрузок.

Наиболее перспективным в этом направлении является применение комбинированного питания транспортных средств. Оно заключается в использовании аккумуляторных батарей, заряжаемых от контактной сети либо при движении, либо на конечных остановках. Зарядные станции подключаются к сети электроснабжения в ограниченном количестве точек, выбираемых путем предварительных технико-экономических расчетов. Такое решение обеспечивает значительное упрощение сети электропитания, снижение капитальных затрат, снижение энергопотребления, повышение надежности работы без ущерба для технических показателей.

В мае 2012 было проведено испытание на дальность пробега трамвайного вагона модели 71-405-11 (рисунок 1), оснащенного системой автономного хода с комбинированным питанием.

Испытания проходили в условиях городского движения практически на всех маршрутах города Екатеринбурга. На линии в непрерывном движении без подпитки от контактной сети трамвай находился 9 ч. и прошел 114 км.

В настоящее время на предприятии ведутся работы по распространению подобных систем для транспорта в горнорудной промышленности, легкорельсового транспорта в металлургии.

### РЕКУПЕРИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РУДНИЧНЫХ САМОХОДНЫХ ВАГОНОВ

При проведении горнопроходческих работ широко используются самоходные грузовые вагоны с электроприводами переменного тока. Они совершают челночные рейсы, двигаясь без разворота в одну сторону с полной нагрузкой, а в обратную – порожними. Профиль горной выработки характеризуется участками с углами наклона до  $\pm 15$  градусов от горизонта, для прохождения которых используется промежуточная скорость движения порядка 6 км/ч. Углы поворота достигают

90 градусов. К электроприводу перемещения вагонов предъявляются следующие требования:

- плавное регулирование скорости движения в диапазоне 5:1 и обеспечение плавного разгона и торможения;
- реверсирование направления движения;
- значительные и продолжительные перегрузки при преодолении подъемов;
- обеспечение затяжных тормозных режимов с рекуперацией энергии в питающую сеть при движении вагона под уклон;
- выполнение требований по электро- и взрывобезопасности, предъявляемых к рудничному электрооборудованию;
- ограниченный объем для размещения электрооборудования.

Предприятием ЗАО «АСК» разработан преобразователь частоты типа ПЧ-ТТЕТ-32-690-УХЛ4, отвечающий перечисленным выше требованиям и обеспечивающий частотное регулирование скорости двигателей переменного тока мощностью до 30 кВт. Основные технические характеристики приведены в таблице 1, внешний вид – на рисунке 2.

Преобразователь прошел опытно-промышленные испытания на самоходном вагоне типа В17К производства ОАО «Копейский машиностроительный завод». Испытания проводились в условиях действующего рудника, принадлежащего ОАО «Уралкалий». Энергоэффективность привода обеспечивается за счет рекуперации энергии торможения в питающую сеть.

### ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ (ТПН)

Нерегулируемый по скорости электропривод (ЭП) переменного тока является наиболее массовым во всех отраслях промышленности и в энергетике. При этом, самым ответственным режимом работы нерегулируемых ЭП является пуск в работу. Это особенно актуально при пуске высоковольтных асинхронных и синхронных двигателей с номинальным напряжением 3, 6 и 10 кВ. Двигатели такого класса напряжения являются, как правило, энергоёмкими объектами, причем часто мощность единичного двигателя соизмерима с мощностью питающей сети или трансформаторной подстанции. Поэтому, обеспечение плавного пуска, ограничение пусковых токов и рационализация включений/отключений такого рода ЭП является весьма актуальной задачей, позволяющей без увеличения мощности подстанции обеспечивать технологический процесс.

Наименование параметра	Технические данные
Номинальный выходной ток, А	32
Номинальное выходное напряжение, В	690
Номинальное значение выходной частоты, Гц	50
Диапазон изменения выходной частоты, Гц	0-120 Гц
Кратность допустимой перегрузки по току в течение 60 секунд, при повторяемости не более одной в 15 минут	2
Допустимое установившееся отклонение напряжения питания, %, не более	плюс 15, минус 20
Рабочее напряжение дискретных входов и выходов, В	= 24
Вид охлаждения	воздушное естественное
Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP00
Масса, кг, не более	65
Габаритные размеры (В × Ш × Г), мм, не более	460×270×580

Таблица 1. Основные технические характеристики ПЧ-ТТЕТ-32-690-УХЛ4.

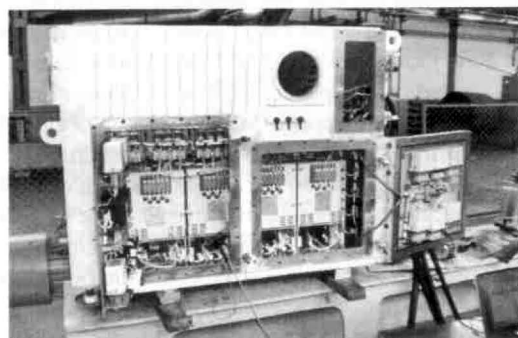


Рисунок 2. Внешний вид преобразователя ПЧ-ТТЕТ-32-690-УХЛ4.

Обзор литературы и энергетическое обследование ряда предприятий позволили обосновать перечень параметров приводных высоковольтных двигателей для номинальных линейных напряжений 3, 6 и 10 кВ. Обоснована и разработана шкала типоразмеров серийно изготавливаемых ЗАО «АСК» групповых преобразователей типа ПАД-В-Г и ПСД-В-Г (таблица 2) и комплектных преобразователей типа ПАД-В-К и ПСД-В-К (таблица 3).

Преобразователи для плавного пуска электроприводов переменного тока, разрабатываемые и производимые ЗАО «АСК», структурно и по техническим характеристикам соответствуют аналогичным отечественным и зарубежным. При этом есть и некоторые отличительные особенности. Используется силовая элементная база преимущественно отечественных производителей. Широко применяются материалы предприятий Уральского региона. Оригинальный алгоритм формирования автоматизированного плавного пуска обеспечивает простоту наладки, настройку на механизмы с различными механическими характеристиками и моментами инерции. Стоимость на 10-15% ниже аналогичных отечественных устройств и на 40-50% зарубежных. Гарантийный срок эксплуатации 5 лет. Имеется сертификат соответствия и разрешение федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на применение на нефтепроводах, газопроводах и в горнодобывающей промышленности. Это достигнуто благодаря гармоничному сочетанию науки, разработки и производства, высокому уровню организации и стратегическому направлению ЗАО «АСК» на развитие отечественной техники и технологий.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 приведена типовая схема электроснабжения высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов с системой группового плавного пуска на базе тиристорного преобразователя напряжения типа ПАД-В-Г.

В настоящее время на предприятиях России и за рубежом ЗАО «АСК» реализовано несколько десятков проектов системы группового и индивидуального плавного пуска синхронных и асинхронных ЭП с использованием ТПН на напряжение сети 3, 6 и 10 кВ и мощностью двигателя от 0,25 до 4 МВт. В таблице 3 приведены основные заказчики систем плавного пуска. Из всего 6 летнего опыта внедрения можно показать что, большое количество устройств плавного пуска устанавливается в системы энергоснабжения не достаточной для прямого пуска мощностью. Это касается вновь вводимых объектов в устаревшую систему энергоснабжения.

Номинальные параметры двигателей		
Линейное напряжение, кВ	Мощность, МВт	Ток, А
3	0,315; 0,63; 0,8	80; 160; 250
6	1; 2; 3,15	125; 250; 400
	5; 6,3; 10	630; 800; 1250
10	1,6; 3,15; 5	125; 250; 400
	8; 12,5	630; 800

Таблица 2. Технические характеристики групповых преобразователей ПАД-В-Г и ПСД-В-Г.

Технические характеристики комплектных преобразователей ПАД-В-К и ПСД-В-К Номинальные параметры двигателей		
Линейное напряжение, кВ	Мощность, МВт	Ток, А
3	0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8	63; 80; 100; 150; 200
6	0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0	40; 50; 63; 80; 100; 125
	1,4; 1,8	160; 200

Таблица 3.

При этом главным критерием является снижение пусковых токов и удержание посадки напряжения на секциях шин в пределах допустимого ГОСТ 10% уровня. Однако, в другой группе механизмов с большим моментом инерции, например, к которым относятся турбокомпрессоры, вентиляторы, дымососы, главным критерием является снижение динамического момента при старте с целью повышения эксплуатационного ресурса именно механизма.

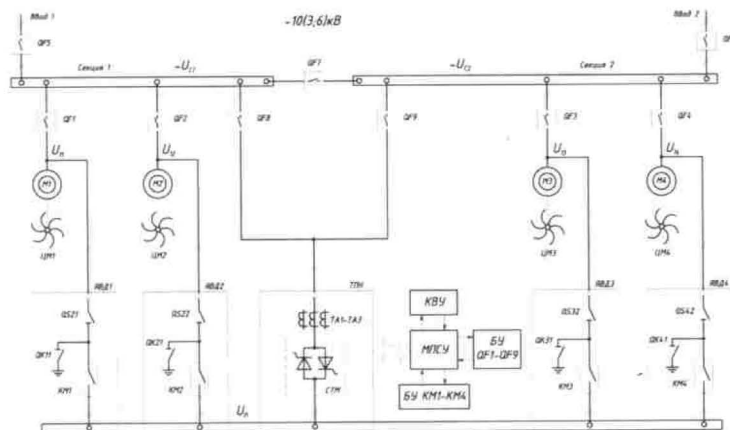
## ГРУППОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ Пониженной частоты

В настоящее время в металлургическом производстве электродвигатели транспортных рольгангов некоторых механизмов и технологических участков работают в режиме, когда частота и действующее значение питающего напряжения отличаются от стандартного. В частности, распространенным вариантом является питание секций рольгангов линейным напряжением 190 В при частоте 25 Гц. Номинальный ток нагрузки обычно составляет 1000...1500 А. Источником напряжения в этом случае на многих предприятиях является электромашинный преобразователь частоты (ПЧ), формирующий систему трехфазного напряжения с заданными параметрами. При высоких показателях качества напряжения такие преобразователи имеют два наиболее существенных недостатка:

- Большие массогабаритные показатели,
- Высокая степень физического износа.

Применение стандартных преобразователей частоты в данном случае ограничивается следующими факторами:

- Низким коэффициент мощности нагрузки.



а)



б)

Рисунок 2. а – схема автоматизированного плавного пуска группы высоковольтных ЭП. ЦМ – центробежный механизм; ЯВД – ячейка выбора двигателей; КВУ – контроллер верхнего уровня; МПСУ – микропроцессорная система управления; БУ – блок управления; б – внешний вид комплектного преобразователя.

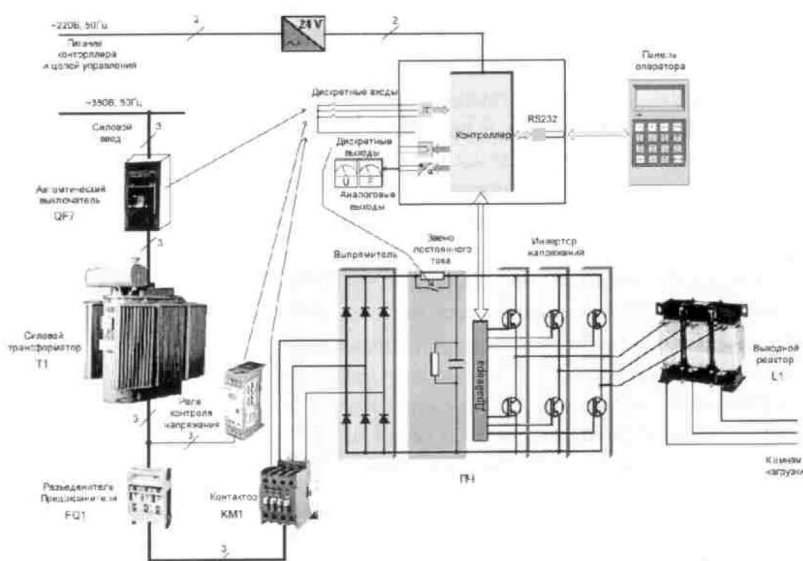


Рисунок 3. Структурная схема преобразователя частоты для группового питания.

- Необходимость использования существующих кабельных линий для питания электродвигателей, что накладывает жесткие требования на амплитуду и скорость изменения напряжения на выходе преобразователя.

- Возможность длительной работы ПЧ в режиме холостого хода, когда нагрузка отключена.

Результаты технико-экономического анализа, проведенные с привлечением аппарата имитационного моделирования, показали, что наиболее рациональным вариантом решения задачи реконструкции является замена электромашинного ПЧ на полупроводниковый преобразователь частоты с нестандартным напряжением питания и с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения. В качестве примера приводятся характеристики ПЧ для системы группового рольганга (рисунок 3):

- Номинальный ток на выходе ПЧ - 1150 А. Перегрузка по току не более 10 % в течение 60 с за период не менее 10 мин.

- Устойчивая работа в установившемся режиме в диапазоне частот от 15 до 25 Гц.

- Максимальное действующее значение первой гармонической составляющей линейного напряжения на выходе ПЧ - 190 В.

- Статическая ошибка задания на частоту (среднее значение) не более 0,1 % от максимального значения, равного 25 Гц.

- Варианты торможения электродвигателей:

- штатный, с использованием режима частотного торможения;

- аварийный, с использованием режима динамического торможения.

- Время увеличения и снижения частоты при пуске и торможении регулируется и может выбираться из диапазона от 1 до 10 с. При этом темп торможения может автоматически корректироваться для обеспечения безаварийного останова.

- Напряжение на выходе ПЧ формируется в функции частоты по закону, обеспечивающему работоспособность рольгангов во всем возможном диапазоне нагрузок.

- Режим работы – круглосуточный, с периодическими плановыми остановками на техническое обслуживание.

Опыт эксплуатации ПЧ подтвердил правильность принятых решений и показал эффективность замены электромашинных преобразователей частоты на современные полупроводниковые в условиях использования существующих кабелей и электрических двигателей при существенном возрастании КПД системы электропитания.