

Тиристорный преобразователь

для плавного пуска высоковольтных асинхронных двигателей

В статье приводятся результаты разработки, производства и применения серии высоковольтных тиристорных преобразователей напряжения типа ПАД-В, предназначенных для плавного пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей с номинальным напряжением 3, 6 и 10 кВ.

**Андрей Ткачук,
к. т. н.**

tkachuk@asc-ural.ru

**Владимир Кривовяз,
к. т. н.**

krivovяз@asc-ural.ru

**Владимир Копырин,
к. т. н.**

kamen@r66.ru

Александр Силуков

silukov@asc-ural.ru

Актуальность

Плавный пуск асинхронных электроприводов (АЭП) относится к одному из наиболее важных и ответственных режимов работы. В первую очередь это относится к нерегулируемым по скорости АЭП, когда в качестве приводного электродвигателя применяется асинхронный короткозамкнутый двигатель (АД). Прямой пуск АД от сети, особенно для АЭП с большим моментом инерции, обладает рядом известных недостатков, главными из которых являются значительные по величине и продолжительные по времени пусковые токи и удары момента на валу двигателя. Эти удары могут в несколько раз превышать номинальные значения [1, 2]. Для исключения указанных недостатков применяются различные способы и устройства плавного пуска асинхронных электроприводов, которые обеспечивают уменьшение напряжения и тока на статоре АД при пуске и формирование специальной траектории напряжения (тока) [1–7]. К наиболее распространенным устройствам плавного пуска (УПП) асинхронных электроприводов относятся тиристорные преобразователи напряжения (ТПН).

ТПН с номинальным напряжением двигателя и питающей сети до 1000 В получили в настоящее время широкое применение благодаря их высокой надежности, низкой стоимости, малым массо-габаритным показателям, простоте эксплуатации и большому их количеству, которое выпускается как отечественной, так и зарубежной промышленностью [2, 3]. В качестве примера может служить тиристорный преобразователь напряжения типа ПАД, разработанный и произведенный НПП «Энергия и экология» [4–6].

Положительный опыт эксплуатации ТПН различных типов для плавного пуска АЭП напряжением до 1000 В позволил перейти к созданию тиристорных преобразователей напряжением выше 1000 В (ТПН-В). Опыт применения ТПН-В позволил оценить их значительную эффективность при использовании для плавного пуска асинхронных двигателей на напряжение 3, 6 и 10 кВ. Двигатели такого класса напряжения являются довольно энергоемкими объектами и широко распространены в промышленности и энергетике. Иногда мощность единичного двига-

теля (например, АЭП воздухоподушки на 8 МВт) соизмерима с мощностью питающей сети или трансформаторной подстанции. Поэтому обеспечение плавного пуска, ограничение пусковых токов и рационализация включений/отключений такого рода АЭП является весьма актуальной задачей. Это обуславливает увеличение спроса на устройства плавного пуска на основе ТПН-В.

Обзор высоковольтных тиристорных преобразователей напряжения

Среди изделий преобразовательной техники устройства плавного пуска на базе ТПН-В являются довольно надежными, они неприхотливы в эксплуатации, имеют относительно невысокую стоимость и малый срок окупаемости. Поэтому производство ТПН-В освоил ряд отечественных предприятий, например ОАО «ВНИИР» (г. Чебоксары), ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск), ЗАО «Нефтяная электронная компания» (г. Пермь) и зарубежные фирмы: АББ, Солкон, Ален Бредли, ХЭМЗ и другие.

Таблица 1. Параметры высоковольтных АД с устройствами плавного пуска

Мощность, МВт	Номинальные параметры высоковольтных АД		
	Наибольший ток статора, А		
	3 кВ	6 кВ	10 кВ
0,2	50	–	–
0,315	80	40	–
0,4	100	50	–
0,5	125	63	–
0,63	160	80	50
0,8	200	100	63
1,0	250	125	80
1,25	315	160	100
1,6	400	200	125
2,0	500	250	160
2,5	630	315	200
3,15	–	400	250
4,0	–	500	315
5,0	–	630	400
6,3	–	800	500
8,0	–	1000	630

Они обеспечивают плавный пуск асинхронных электроприводов в широком диапазоне напряжений и мощности. В состав силовой схемы устройства, в зависимости от назначения и типа, могут быть включены шунтирующий и линейный вакуумный контактор, разъединитель, заземлитель, предохранители и т. п. В таблице 1 приведены основные параметры приводных АД, которые снабжаются ТПН-В.

Для обеспечения возрастающего спроса на устройства плавного пуска ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» (г. Екатеринбург) разработало и освоило производство серии высоковольтных ТПН типа ПАД-В для асинхронных двигателей [7]. В основу разработки были положены технические решения устройства плавного пуска типа ПАД для асинхронных двигателей напряжением 380 и 500 В [4–6]. Опыт их разработки, испытаний и эксплуатации позволил предложить и реализовать в ТПН-В типа ПАД-В все оригинальные и рациональные технические решения низковольтных тиристорных преобразователей типа ПАД [4].

Концепция построения преобразователей типа ПАД-В

При создании высоковольтных тиристорных преобразователей напряжения типа ПАД-В реализована концепция, которая характеризуется следующими аспектами:

- использование всех положительно зарекомендовавших конструктивных решений ТПН типа ПАД;
- применение блочно-модульной конструкции силовой части ТПН-В для номинальных напряжений питающей сети 3, 6 и 10 кВ на базе унифицированного высоковольтного тиристорного модуля (ВТМ);
- использование унифицированной цифровой системы управления на базе высокопроизводительного однокристального RISC-микроконтроллера [5, 6];
- реализация информационной части ТПН-В на специализированных высоковольтных датчиках, обеспечивающих измерение, кодирование и передачу информации о координатах АЭП по волоконно-оптическому каналу связи в системный контроллер;
- использование оригинального алгоритма формирования тока (напряжения) статора двигателя, питаемого от преобразователя типа ПАД-В.

Функциональная схема типового преобразователя типа ПАД-В приведена на рис. 1. Она включает: силовой преобразователь СП; информационно-кодирующую часть ИКЧ; волоконно-оптическую линию связи ВОЛС; оптический интерфейс ОИ; системный контроллер СК и пульт управления ПУ. Силовой преобразователь состоит собственно из тиристорного регулятора напряжения UZ с фазовым управлением, трансформаторов тока ТА, ограничителей перенапряжения RU типа ОПН и шунтирующего силового коммутационного аппарата КМ, например, вакуумного контактора. В основе UZ лежат функционально и конструктивно законченные высоковольт-

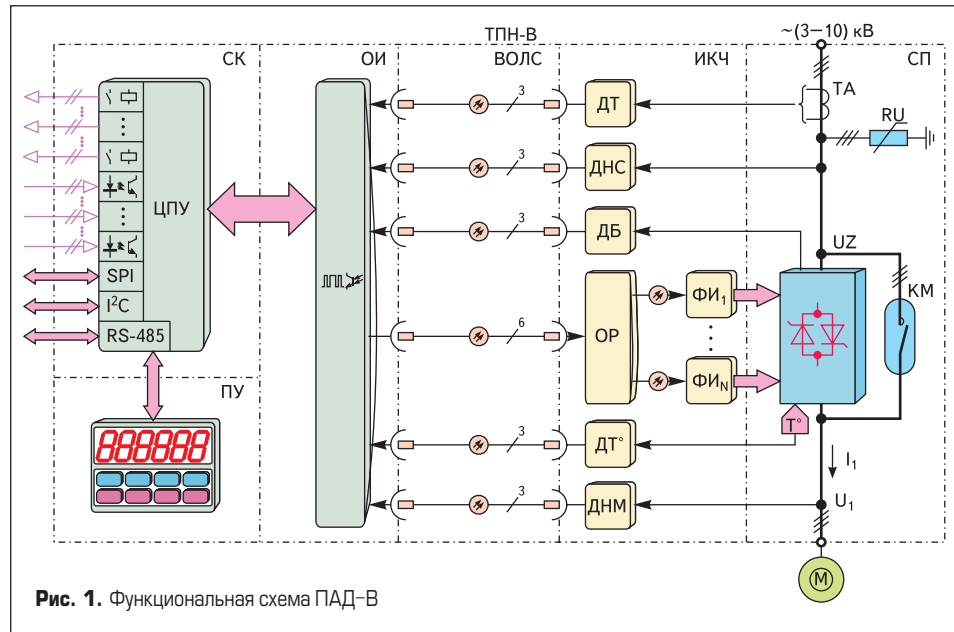


Рис. 1. Функциональная схема ПАД-В

ные тиристорные модули типа ВТМ (рис. 2). Модуль включает в себя: два встречно-параллельных тиристора VS1 и VS2 с охладителями; RC-цепь R1 и C1; выравнивающий резистор R2 и оптоуправляемые формирователи импульсов ФИ тиристоров. В зависимости от расположения модуля в схеме он дополнительно снабжается датчиком напряжения, температуры или синхронизации с оптическим выходом. Уже разработаны и изготовлены модули типа ВТМ-250-2к и ВТМ-400-2к. Модуль первого типа предназначен для коммутации тока силой до 800 А (номинальный ток двигателя — 250 А), а второй — до 1400 А (400 А) при напряжении на нем до 2 кВ с естественным охлаждением тиристора. Проводятся работы по созданию ВТМ с этим же классом напряжения на номинальные токи 630, 800 и 1000 А. В зависимости от тока в силовых модулях применяются высоковольтные отечественные тиристоры типа Т253-500-60, Т173-1000-60 или Т193-2000-60 производства ОАО «Электровыпрямитель».

При построении ТПН-В соответствующей модификации ВТМ объединяются в последовательные фазные модульные группы. Каждая такая группа содержит в зависимости от напряжения сети (3, 6 или 10 кВ) соответственно 2, 3 или 5 ВТМ. В зависимости от мощности двигателя, согласно таблице 1, устанавливается ВТМ с соответствующим током.

Информационно-кодирующая часть включает следующие датчики: линейных тока ДТ и напряжения ДНС сети; баланса вентильных групп ДБ, необходимые для диагностики исправности тиристоров; оптических разветвителей ОР, которые усиливают и одновременно распределяют импульсы управления на все тиристоры фазных групп; температуры тиристоров ДТ° и линейного напряжения ДНМ машины. Датчики напряжения обеспечивают непосредственное (без трансформатора) измерение линейных напряжений, аналого-цифровое преобразование в последовательный код и передачу его по волоконно-оптической линии связи ВОЛС в плату оптического интерфейса ОИ. По аналогичному принципу работают дат-

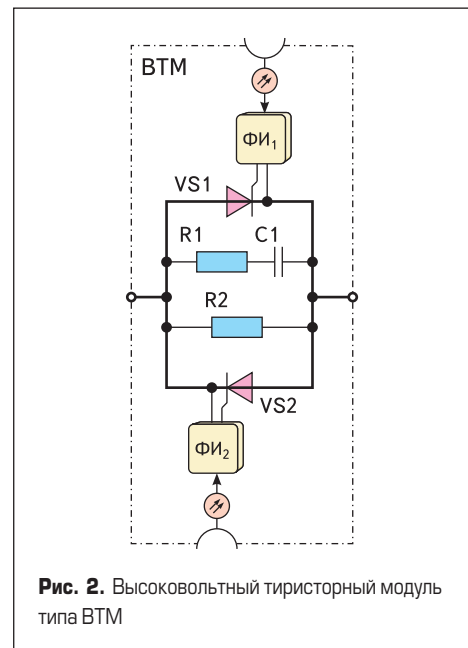


Рис. 2. Высоковольтный тиристорный модуль типа ВТМ

чики температуры, тока и баланса вентильной группы. Датчики унифицированы и применяются для всех модификаций ПАД-В с напряжением от 3 до 10 кВ. Все электронные платы выполнены на современном оборудовании с применением технологии поверхностного монтажа. Высоковольтные платы датчиков и формирователей импульсов покрыты специальным эластичным силиконовым лаком. Лак обеспечивает необходимую защиту от влаги, пыли и коронирующих разрядов.

Система управления

Для управления ТПН-В разработана унифицированная цифровая система управления, реализованная на базе высокопроизводительного однокристального RISC-микроконтроллера. Она является продуктом развития цифровых систем управления, примененных для ТПН напряжением до 1000 В различного назначения [5, 6]. Новая система обладает мощными вычислительными возможностями и развитой периферией

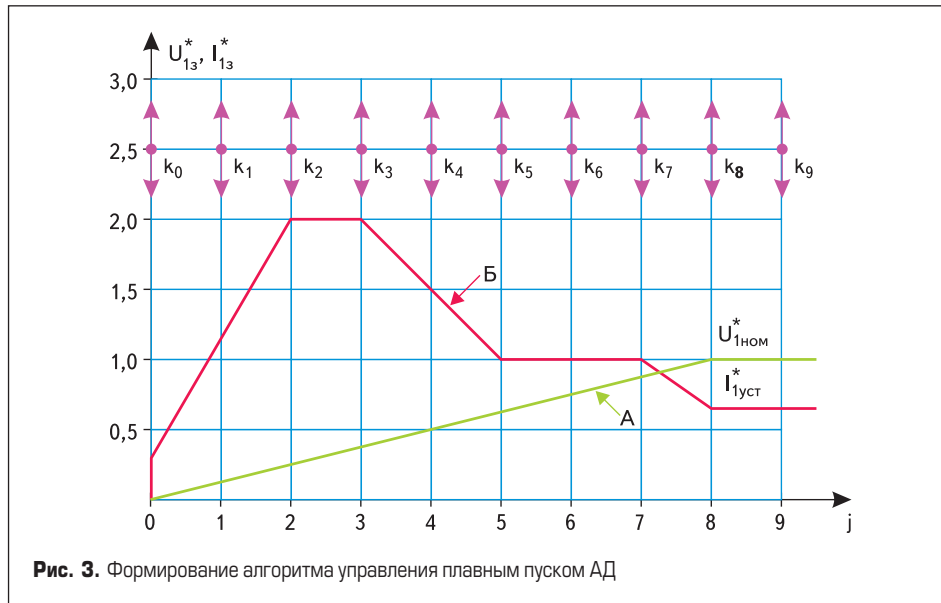


Рис. 3. Формирование алгоритма управления плавным пуском АД

с оптическим и электрическим интерфейсами. Она обладает высокой «гибкостью», так как алгоритм функционирования в значительной степени определяется программным обеспечением и применяется для всех типов высоковольтных УПП типа ПАД-В. Система реализует прямое цифровое управление ТПН-В и технологическими параметрами. Структура системы включает в себя три электронные платы. Две из них основные и необходимые.

Первая — это плата системного контроллера (СК). В структуру этой платы включен собственно однокристалльный микроконтроллер типа AVR, узлы изолированного дискретного ввода-вывода, питания, электрического и оптического RS-485, часы реального времени для протоколирования ошибочных ситуаций и датчик системной температуры. Системный контроллер организует общий алгоритм функционирования и информационный обмен между остальными модулями системы по различным протоколам: SPI, I²C, MODBUS и скоростной параллельный.

В качестве сервисных функций программа СК дополнена блоками по вычислению мощности, потребленной энергии, счетчика времени наработки оборудования, программируемым задатчиком, ПИ-, ПИД-регулятором, различными функциональными преобразователями и другими. Эти блоки вводятся в общий алгоритм в зависимости от требований к плавному пуску АЭП. Большинство функций защиты и диагностики также реализованы на программном уровне. К защитам относятся: обрыв фазы, мгновенная от сверхтоков, электронная времятоковая от токов перегрузки, от перегрева тиристоров и от несостоявшегося пуска. Результатом действия защиты является снятие импульсов с тиристоров, отключение преобразователя и индикация номера аварийного режима. К диагностике относятся: несимметрия линейных напряжений и тока, пробой одного из тиристоров в фазной группе. При таких режимах преобразователь не отключается, но оператор по показаниям на дисплее может определить вид аварийного режима и величину.

Вторая плата — это оптический интерфейс ОИ. Она предназначена для преобразования поступающего с ВОЛС последовательного кода в параллельный, усиления и передачи по оптоволокну импульсов управления тиристорами. Плата ОИ по существу является информационным мостом, соединяющим ИКЧ с системным контроллером.

Третья плата — это пульт управления ПУ. Она содержит светодиодный дисплей, точечные индикаторы и клавиатуру. На дисплей выводятся показания измеряемых координат ТПН-В, технологические установки, параметры настроек системы ЭП, коды ошибок и др. На точечные индикаторы выводятся состояние установки, преобразователя, вид отображаемого параметра, а также аварийные режимы. Все необходимые настройки системы выполняются с клавиатуры.

Структура САУ преобразователя может быть настроена для различных режимов пуска АД. Благодаря наличию универсального программируемого задатчика [4–6] может быть реализован любой алгоритм формирования управляющего воздействия, математическое описание которого имеет вид:

- 1) При обратной связи по напряжению (формирование напряжения статора АД)

$$U_{13}(t) = y^*(t)M_U/100,$$

где $y^*(t)$ — закон относительного управляющего воздействия, %; M_U — масштабный коэффициент напряжения, В; t — время, с.

- 2) При обратной связи по току (формирование тока статора АД)

$$I_{13}(t) = y^*(t)M_I/100,$$

где M_I — масштабный коэффициент тока, А.

- 3) Без обратной связи (формирование угла управления тиристоров в разомкнутой САУ)

$$\alpha_3(t) = y^*(t)M_\alpha/100,$$

где M_α — масштабный коэффициент угла управления, электрических градусов.

Закон относительного управляющего воздействия определяется следующим выражением

$$y^*(t) = Y_j + k_j t,$$

где k_j — коэффициент аппроксимации на j интервале пусковой траектории; $Y_j \in [0; 100]$ — массив конечных величин пусковой траектории; $j = 0, 1, \dots, 9$ — номер интервала аппроксимации.

Коэффициент аппроксимации имеет вид

$$k_j = (Y_{j+1} - Y_j)/\Delta t,$$

где $\Delta t = T_{\text{П}}/10$ — интервал времени аппроксимации, с; $T_{\text{П}}$ — время пуска двигателя, с.

Пример графической интерпретации алгоритмов формирования траектории напряжения (график А) и тока (график Б) при плавном пуске АД приведен на рис. 3. По оси ординат расположены относительные величины напряжения U^*_{13} и тока I^*_{13} статора двигателя, которые определяются по формулам

$$U^*_{13} = U_{13}/U_{1\text{ном}}, I^*_{13} = I_{13}/I_{1\text{ном}},$$

где $U_{1\text{ном}}, I_{1\text{ном}}$ — номинальные значения напряжения и тока статора АД соответственно.

Конструкция

Конструктивно преобразователи класса напряжения 3 кВ и номинальным током до 250 А выполняются в одном шкафу. Шкаф содержит собственно силовой преобразователь, ограничители перенапряжений, трансформаторы тока, систему управления, панель реле и шунтирующий вакуумный контактор. В качестве примера на рис. 4 показан внешний вид серийного преобразователя типа ПАД-В-200-3к, основ-

Таблица 2. Технические характеристики преобразователя типа ПАД-В-200-3к

№	Наименование параметра	Ед. изм	Величина
1.	Номинальное напряжение силовой питающей сети	В	3000
2.	Число фаз		3
3.	Частота напряжения питающей сети	Гц	50
4.	Допустимое отклонение напряжения питающей сети от номинального	%	±15
5.	Номинальный ток электродвигателя	А	200
6.	Максимальная мощность пускаемого двигателя	кВт	800
7.	Максимальная кратность пускового тока		3,5
8.	Диапазон регулирования выходного напряжения	%	0–100
9.	Режим работы		S2
10.	Количество пусков подряд с максимальным током (после перерыв — 10 мин)		4
11.	Регулируемое время пуска	с	5–250
12.	Размеры (высота×ширина× глубина)	мм	2300×800×600
13.	Масса, не более	кг	300
14.	Исполнение оболочки по ГОСТ 14254		IP31
15.	Климатическое исполнение по ГОСТ 15150		УХЛ4



Рис. 4. Внешний вид преобразователя типа ПАД-В-200-3к



Рис. 5. Компонировка конструктивных элементов ПАД-В-200-3к

ные технические характеристики которого приведены в таблице 2. Электронные платы информационно-кодирующей части располагаются на стеклотекстолитовых панелях над тиристорными модулями и закрыты защитным кожухом из оргстекла (рис. 5). Элементы низковольтной автоматики и релейно-кон-

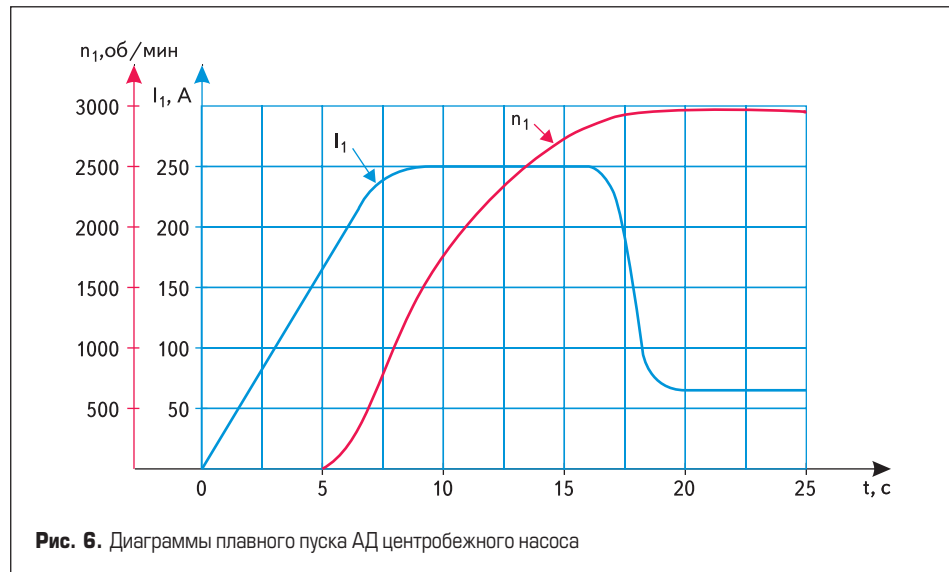


Рис. 6. Диаграммы плавного пуска АД центробежного насоса

такторной аппаратуры сконпонованы на двери шкафа. Платы системного контроллера и оптического интерфейса помещены в герметичный металлический бокс.

Преобразователи на напряжение 6 и 10 кВ выполняются в нескольких шкафах. При этом каждая фазная группа ТПН-В, включающая также ОПН, трансформатор тока и проходные шины, выполняется в отдельном шкафу. Система управления и вся низковольтная релейная автоматика располагается в отдельном герметичном шкафчике. Такая компоновка позволила свободно разместить ВТМ, увеличить зазоры безопасности и длину пути тока утечки. Применяется естественное охлаждение тиристоров, что также увеличивает надежность преобразователя при эксплуатации в запыленных и влажных средах.

Опыт эксплуатации

В настоящее время один из преобразователей типа ПАД-В-80-3к эксплуатируется на насосной станции одной из шахт ОАО «Урал-электромет» [7]. Он используется для плавного пуска водонаполненного асинхронного двигателя типа ПЭДВ 250-320 В5М погружного насоса. Насос требуется для откачки воды из шахты глубиной более 150 м при превышении допустимого уровня. Требуется довольно частый пуск-останов насоса при номинальной нагрузке. При прямом пуске это приводит к быстрому износу насоса и двигателя, так как пусковой момент согласно паспортным данным в 4 раза превышает номинальный. Ресурс работы двигателя значительно снижается. Замена двигателя или его ремонт весьма проблематичны, так как требуется подъем насоса из глубины, разборка трубопроводов и т.п.

На рис. 6 показана диаграмма тока статора и частоты асинхронного двигателя при плавном пуске. Запуск двигателя осуществлялся в замкнутой системе регулирования с обратной связью по току статора. Обеспечивалась отсечка по току на уровне 3-кратного номинального. При этом время пуска составляет 18 с. Устройство в полной мере соответствует предъявляемым требованиям и положительно зарекомендовало себя в эксплуатации.

На серию тиристорных преобразователей для плавного пуска типа ПАД-В на напряжение 3, 6 и 10 кВ Госстандартом России выдан сертификат соответствия РОСС RU.АИ16.НО3944.

Литература

1. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия. 1972.
2. Справочник электроэнергетики предприятий цветной металлургии / Под ред. Басальгина М. Я., Копырина В. С. М.: Металлургия. 1991.
3. Копырин В. С., Бородацкий Е. Г., Ткачук А. А., Бородацкая В. В. Применение тиристорных преобразователей напряжения для электропривода, электротехнологии и освещения на предприятиях цветной металлургии. Материалы международной НТК «Наука и новые технологии в энергетике». Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова. 2002.
4. Копырин В. С., Ткачук А. А., Бородацкий Е. Г. Преобразователь типа ПАД для плавного пуска асинхронного электропривода. В сб. докл. науч.-практ. семинара «Энергосберегающая техника и технологии». Екатеринбург: Уральские выставки. 2002.
5. Ткачук А. А., Копырин В. С., Бородацкий Е. Г. Унифицированная микроконтроллерная система управления тиристорными преобразователями напряжения. Материалы международной НТК «Наука и новые технологии в энергетике». Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова. 2002.
6. Копырин В. С., Ткачук А. А., Бородацкий Е. Г. Микроконтроллерная система управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии. Тезисы докладов НТК «Совершенствование энергетики цветной металлургии». Екатеринбург: Уралэнергоцветмет. 2001.
7. Ткачук А. А., Силуков А. Ю., Кривовяз В. К. Опыт применения преобразователя типа ПАД-В для плавного пуска высоковольтных двигателей. В сб. докл. науч.-практ. конф. «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: Уральские выставки. 2006.