

# Реконструкция преобразовательных подстанций

## для питания электролизеров алюминия

**В статье приводятся технические характеристики, описание и технико-экономические показатели реконструкции преобразовательных подстанций с заменой диодных преобразовательных агрегатов с дросселями насыщения на тиристорные.**

**На российских алюминиевых заводах широкое распространение получили электролизеры с самообжигающимися анодами с номинальным током 160–165 кА. В последние годы, благодаря применению усовершенствованных технологий, наметились тенденции увеличения производительности электролизеров. Непременным условием реализации этих тенденций является увеличение мощности кремниевых преобразовательных подстанций (КПП), питающих серии из последовательно соединенных электролизеров постоянным током.**

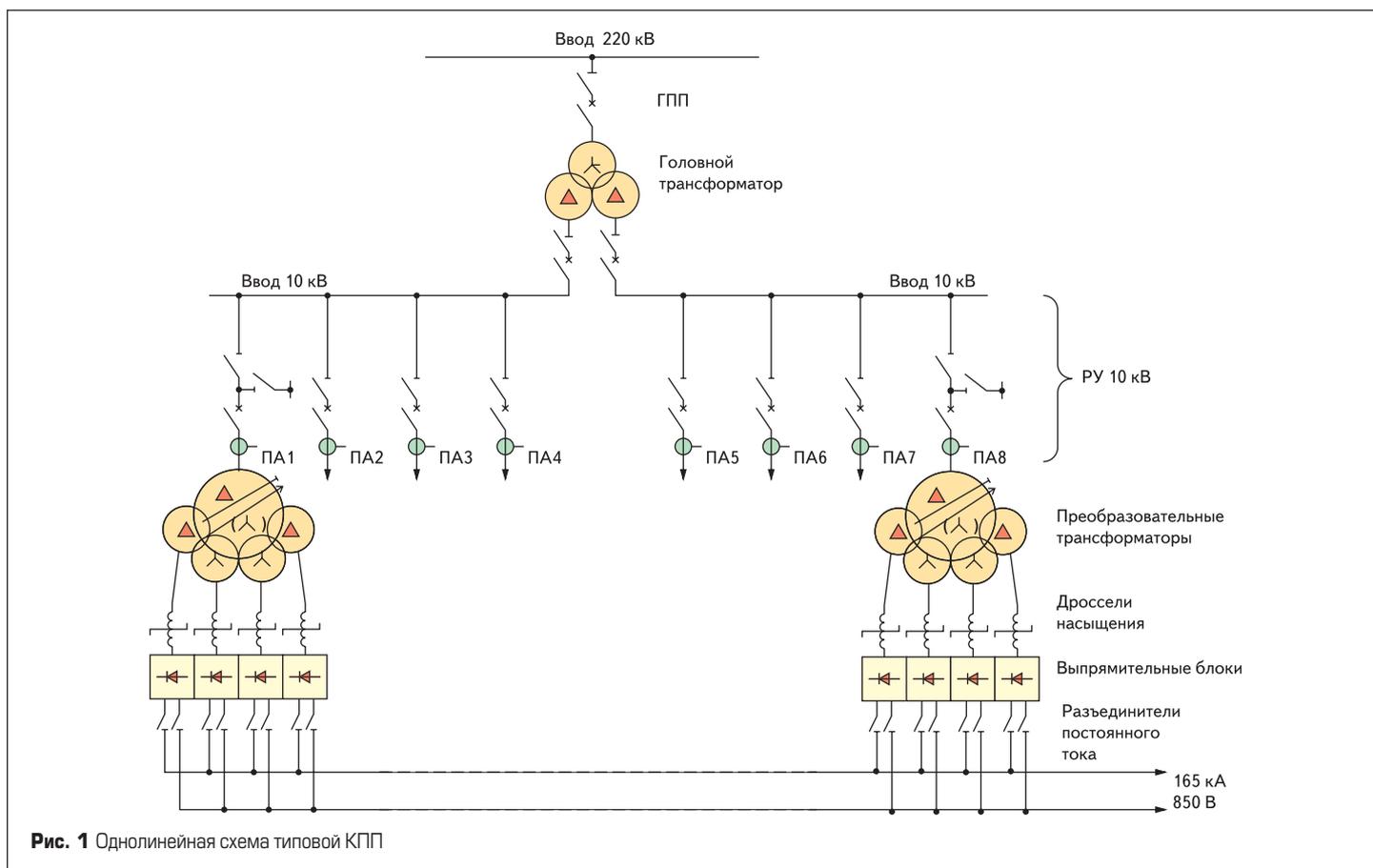
**Владимир Бобков  
Александр Бобков,  
к. т. н.**

bobkov\_a@mail.ru

Однолинейная схема типовой КПП приведена на рис. 1. Она содержит восемь преобразовательных агрегатов с выходными параметрами по постоянному току 25 кА, 850 В [1]. Основными силовыми элементами преобразовательного агрегата (ПА) являются преобразовательный трансформатор, дроссели насыщения и выпрямительные блоки. Агрегаты подключаются к шинам 10 кВ через раз-

единители и автоматические выключатели, расположенные в распределительном устройстве (РУ) 10 кВ, а к сборным шинам — через разъединители постоянного тока (РПТ). Шины 10 кВ запитаны от трансформатора 220/10 кВ, установленного на головной понижающей подстанции (ГПП).

Регулирование выпрямленного напряжения производится ступенчато путем переключения отводов



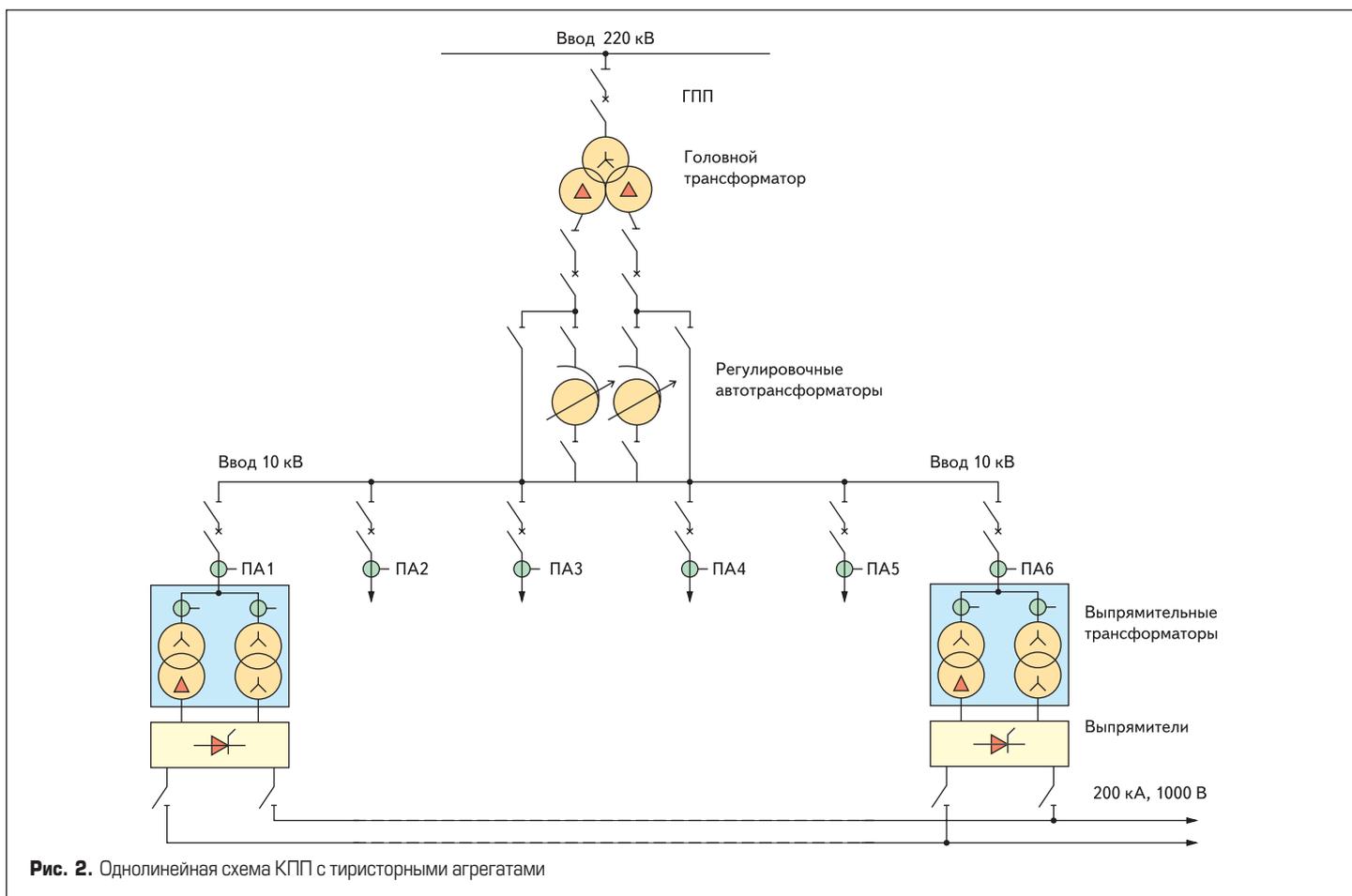


Рис. 2. Однолинейная схема КПП с тиристорными агрегатами

регулировочной обмотки под нагрузкой (РПН) в трех диапазонах, переключаемых без возбуждения (ПВВ). Плавное регулирование напряжения в пределах одной-двух ступеней РПН осуществляется дросселями насыщения (ДН).

Агрегаты имеют свободную компоновку, трансформатор устанавливается на открытом воздухе, а остальное оборудование размещается в капитальном здании КПП. Первый этаж здания КПП занят сборными шинами постоянного тока, РПТ и ДН. Выпрямительные блоки установлены на втором, а порой и на третьем этаже КПП, причем длина шин переменного тока может достигать до 12 м. Катодные и анодные части выпрямительных блоков, выполненных по мостовой схеме, находятся в отдельных стальных шкафах, расположенных на одной линии.

Начатая на некоторых предприятиях реконструкция КПП сводится к замене силовых элементов преобразовательных агрегатов на более мощные. При таком подходе сохраняются все недостатки преобразовательных подстанций, с момента проектирования которых прошло более тридцати лет.

Так как регулирование напряжения преобразовательных трансформаторов ведется по первичной обмотке, глубина регулирования напряжения ограничена. На практике она составляет порядка 60%. На эту же величину приходится завышать габаритную мощность преобразовательного трансформатора. При небольшом числе витков вторичной обмотки невозможно обеспечить равенство напряжений частей, соединенных в «треугольник» и «звезду», размещенных на одном магнитопроводе. Выравнивание нагрузки выпрямительных блоков производится путем задержки начала коммутации в блоках,

подключенных к частям вторичной обмотки, соединенным в «треугольник». Величина задержки составляет 6–8 град. эл., что приводит к неравенству межкоммутационных интервалов и появлению неканонических гармоник в напряжении сети. Для ограничения добавочных потерь и динамических усилий части вторичной обмотки трансформаторов выполняются переплетенными с чередованием катушек «треугольник» и «звезда». Это приводит к появлению недопустимых уравнивающих токов между фазосмещенными частями вторичной обмотки. Для их ограничения пакеты сборных шин, идущих от выпрямительных блоков «треугольник» и «звезда» в корпус электролиза, делают изолированными. Однако при увеличении эквивалентной пульсности КПП, то есть сдвиге фаз преобразовательных трансформаторов, этой меры недостаточно.

Дополнительное разделение частей вторичной обмотки «звезда» и «треугольник» на две была вынужденной для ограничения аварийных токов через диоды. С появлением мощных полупроводников необходимость в этом отпала. Наличие в вытянутых в одну линию выпрямительных блоках 24-х вводов переменного тока и 8-ми выводов постоянного тока вынуждает сокращать изоляционные промежутки между токоведущими частями разного напряжения, тем более что напряжение между ними выросло.

Неоправданно длинная ошиновка переменного тока между трансформаторами и выпрямительными блоками приводит к дополнительному падению напряжения до 15 В. При такой длине на времени коммутации разных фаз начинает сказываться несимметричное

расположение шин, что также приводит к неравенству межкоммутационных интервалов.

На сибирских алюминиевых заводах применяется одноконтурное воздушное принудительное охлаждение выпрямительных блоков. Для очистки охлаждающего воздуха используются фильтры различных типов. В условиях загрязненной атмосферы, причиной которой являются глиноземная пыль и выбросы цехов подготовки анодной массы, содержание фильтров сопряжено с большими эксплуатационными расходами. Как показывает опыт эксплуатации, все равно приходится проводить периодическую трудоемкую чистку выпрямительных блоков. Подвод шин переменного и постоянного тока в блоках с воздушным охлаждением осуществляется снизу, что приводит к неравномерному распределению тока по установленным на вертикальных шинах диодам и предохранителям. Для выравнивания токов принимаются различные меры, усложняющие конструкцию блоков и увеличивающие их стоимость.

Эффективность модернизации КПП может быть значительно повышена посредством применения тиристорных преобразовательных агрегатов. По данным одного из крупнейших поставщиков преобразовательной техники АBB, тиристорные агрегаты вытеснили диодные в электрохимии, электролизе магния, меди, никеля, а доля тиристорных агрегатов в электролизе алюминия неуклонно возрастает. Это касается в первую очередь небольших и средних по мощности серий на токи до 200 кА. Многолетний опыт эксплуатации тиристорных агрегатов на Таджикском, Волховском и Богословском алюминиевых заводах,

«Норильском никеле», «Южуралникеле», а также в дуговых печах постоянного тока, где условия эксплуатации значительно жестче, показал, что надежность тиристорных агрегатов вполне достаточна для применения их для питания электролизеров алюминия.

Тиристорные преобразовательные агрегаты обладают рядом несомненных достоинств. Сегодня стоимость тиристорных выпрямительных блоков и потери в них меньше, чем суммарная стоимость и потери в диодных выпрямительных блоках с дросселями насыщения. В трансформаторах тиристорных агрегатов достаточно иметь 7–9 ступеней в рабочей зоне для ограничения диапазона плавного регулирования напряжения на уровне диапазона дросселей насыщения. Пусковые режимы электролизеров алюминия могут быть обеспечены путем фазового управления тиристорами.

Современные цифровые системы импульсно-фазового управления тиристорами обеспечивают, в отличие от ДН, равенство углов управления  $\alpha$  разных фаз, что исключает появление неканонических гармоник при повышении пульсности преобразовательной подстанции, эквивалентной режиму выпрямления. Начало коммутации (переход тока с фазы на фазу) в тиристорном агрегате задается непосредственно подачей управляющих импульсов. В диодных агрегатах с дросселями насыщения токами управления задается только начальная точка на характеристике ДН, возврат его в начальную точку происходит во время коммутации. Так как трансформаторы, шины переменного тока, дроссели насыщения имеют разброс электромагнитных параметров, длительность межкоммутационных интервалов не одинакова, что и предопределяет появление в сети неканонических четных гармоник. Сказанное подтверждается исследованием энергетических характеристик тиристорных и диодных с ДН подстанций, выполненных на Богословском алюминиевом заводе.

Высокое быстродействие тиристорных агрегатов обеспечивает стабилизацию тока в динамических режимах при возникновении и гашении анодных эффектов. Наличие тиристорных позволяет ограничивать аварийные токи сдвигом либо снятием импульсов управления, что особенно важно при параллельной работе агрегатов на одну нагрузку.

Цифровые системы управления диодным с ДН и тиристорным агрегатами практически одинаковы, так как обмотки управления ДН питаются от маломощных тиристорных выпрямителей, также имеющих устройства импульсно-фазового управления. Система управления тиристорным агрегатом отличается только наличием формирователей импульсов управления (драйверов) тиристорами. Это достаточно простое устройство, которое за десятилетия применения тиристорных доведено до совершенства.

Однолинейная схема КПП с тиристорными преобразовательными агрегатами приведена на рис. 2. Она содержит шесть преобразовательных агрегатов с выходными параметрами 40 кА, 1000 В совмещенного исполнения (тир-блок). Используется схема выпрямления «двойной мост». Преобразовательные трансформаторы без регулирования напряжения

имеют две активные части — «треугольник» и «звезда». Тиристорный выпрямитель устанавливается напротив выводов вторичных обмоток трансформатора. Регулировочные автотрансформаторы имеют девять ступеней напряжения. Две ступени предназначены для компенсации снижения напряжения сети. Глубина регулирования напряжения — 15% от номинального. Так как автотрансформаторы имеют небольшой диапазон регулирования напряжения, их расчетная мощность [2] составляет 2×25 МВА. Автотрансформаторы могут быть выведены из работы посредством разъединителей при сохранении работоспособности подстанции.

Так как уравнивающие токи между фазосмещенными выпрямительными мостами ограничиваются за счет конструкции трансформатора, выпрямитель выполняется в виде единого компактного блока (рис. 3).

Охлаждение выпрямителя — типа «вода-воздух» с дополнительной циркуляцией охлажденного воздуха внутри выпрямителя. Такое исполнение выпрямителя исключает попадание пыли и влаги на токоведущие части, находящиеся под высоким напряжением. Выпрямители могут устанавливаться в специальных контейнерах заводской готовности [3]. В этом случае здание КПП может быть снесено, тем более что некоторые из них требуют дорогостоящего капитального ремонта.

Сравнительные показатели КПП с диодными и тиристорными агрегатами приведены в таблице.

Применение тиристорных агрегатов при модернизации КПП позволяет снизить стоимость оборудования, значительно повысить качество регулирования тока, уменьшить эксплуатационные расходы за счет сокращения затрат и материалов на проведение регламентных работ по обслуживанию оборудования.

Реконструкция КПП производится без снижения выпуска алюминия. Вначале производится поочередная замена преобразовательных агрегатов, а затем в двух освободившихся



Рис. 3. Тиристорный выпрямительный блок 40 кА, 1000 В

Таблица. Сравнительные показатели КПП с диодными и тиристорными агрегатами

Показатель	Величина	
	Тиристор	Диод
Габаритная мощность преобразовательного трансформатора, МВА	45	50
Расчетная мощность автотрансформаторов, МВА	2×25	нет
Суммарная габаритная мощность трансформаторов, МВА	320	400
Номинальное выпрямленное напряжение, В	1000	1000
Номинальный выпрямленный ток агрегата, кА	40	32
Количество агрегатов	6	8
Количество вводов переменного тока в выпрямительные блоки	6	24
Количество выводов постоянного тока	2	8
Количество разъединителей постоянного тока	2	8
Количество приводов РПН	2	8
Количество приводов ПБВ	нет	8
Количество тиристорных или диодов	72	144
Разделение пакетов шин «звезда» и «треугольник»	нет	требуется
Быстродействие системы регулирования тока, мс	10	200
Быстродействие защиты на снятие тока, мс	10	140
Погрешность системы стабилизации тока в динамике, %	0,5	3
Разность напряжений обмоток «звезда» и «треугольник»	нет	более 1%
Сдвиг начала коммутации в обмотках «треугольник» для выравнивания тока блоков, град. эл.	нет	до 8
Падение напряжения в ошиновке переменного тока, В	2	12–15
Фазность режима выпрямления КПП	36 (72)	24 (48)
Величина межкоммутационных интервалов, град. эл.	10 (5)	15 (7,5)
Фактический разброс межкоммутационных интервалов, град. эл.	0,2	3
Генерация четных гармоник в сеть	нет	есть
Уровень шумов, дБ	ниже 80	выше 80
Относительная цена полного комплекта на КПП, %	менее 70	100
Относительная стоимость эксплуатации, %	менее 40	100

ся ячейках размещаются регулировочные трансформаторы. При выводе из работы головного понижающего трансформатора 220/10 кВ преобразовательные агрегаты переводятся на резервную систему шин 10 кВ с сохранением полной управляемости КПП. Учитывая, что трансформаторы для тиристорных агрегатов имеют меньшие габариты и массу, при модернизации КПП может быть заложен резерв на увеличение тока и напряжения серии.

#### Литература

- Басалыгин М. Я., Браславский И. Я., Бобков В. А. и др. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии. М.: Металлургия. 1991.
- Вольдек А. И. Электрические машины. 3-е изд. Л.: Энергия. 1978.
- Бобков В. А., Неуймин О. А., Бобков А. В. Мощные тиристорные преобразователи для электротехнологии контейнерного исполнения // В сб. Автоматизация и прогрессивные технологии. Тр. IV межотр. научно-техн. конф. Новоуральск: Изд.НГТИ. 2005.