

# Реверсивный тиристорный преобразователь

## для электролиза галлия

**В статье приводятся результаты разработки, исследования и производства реверсивного тиристорного преобразователя, реализующего различные алгоритмы тока в цепи электролизеров по производству галлия. Данная статья является составной частью и развитием работ, проводимых авторами в направлении силовых управляемых выпрямителей для электротехнологии.**

**Александр Бобков,**  
к. т. н.

bobkov\_a@mail.ru.

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

kamen@mail.ur.ru

Галлий широко используется в производстве полупроводниковых приборов, лазеров, специальных сплавов, оптике и медицине. Причем область применения галлия постоянно расширяется и спрос на него ежегодно возрастает не менее чем на 20%. В этой связи увеличивается производство галлия и совершенствуются способы его получения.

Одним из перспективных способов получения галлия является электролиз растворов глиноземного производства [1]. Основной вклад в разработку и практическую реализацию способа электролитического получения галлия внесли ученые и специалисты Института химии твердого тела (ИХТТ) Уральского научного центра Академии наук СССР и Уральского алюминиевого завода [1]. Особенностью этого способа является многократное повторение циклов электролиза с целью получения богатых галлием и цинком щелочных растворов с последующим выделением черного галлия путем электролиза или цементации галламой алюминия.

Следовательно, эффективность производства галлия данным способом обусловлена следующими факторами:

- техническими, энергетическими и стоимостными показателями силового полупроводникового преобразователя (СПП), предназначенного для получения, регулирования и формирования заданного выпрямленного тока в цепи электролизеров галлия;
- конструкцией и параметрами электролизера галлия;
- оптимальным числом электролизеров в одной последовательной цепи;
- обоснованием оптимального алгоритма формы тока в цепи электролизеров с точки зрения реализации эффективного технологического процесса и энергосбережения, учитывая значительную энергоемкость электролизного производства галлия;
- параметрами системы энергоснабжения электролизного производства галлия.

Перечисленные задачи были успешно решены творческим коллективом специалистов ОАО «Российская электротехническая компания» (РОСЭЛКО), ИХТТ Уральского отделения РАН, ООО «Галлий» и НПП «Энергия и экология» (НПП «ЭНЕК»).

ИХТТ УрО РАН совместно с ООО «Галлий», учитывая многолетний опыт электролизного производства галлия на Уральском алюминиевом заводе, разработал конструкцию электролизера с высокими технико-экономическими показателями. Были сформулированы следующие требования к СПП:

- выпрямленный ток в цепи электролизеров должен регулироваться в пределах от 6 до 12,5 кА;
- число последовательно включенных электролизеров в цепи может находиться в пределах от четырех до десяти;
- падение напряжения на одном электролизере — 4–5 В;
- система электроснабжения производства галлия должна иметь только трехфазную сеть с напряжением 0,4 кВ.

В соответствии с этими требованиями ОАО «РОСЭЛКО» разработало, изготовило и внедрило на ООО «Галлий» два комплекта (для двух цепей электролиза) реверсивных тиристорных преобразователей (РТП) [2–7]. Основные сведения об РТП для электролиза галлия приведены в таблице 1. На рис. 1 приведена упрощенная функциональная схема РТП.

**Таблица 1.** Технические данные преобразовательного агрегата ПТР12500/36 УХЛ4

| Наименование параметра                                 | Величина      |
|--|---------------|
| Номинальное напряжение сетевой обмотки, В              | 380           |
| Номинальные ток нагрузки, кА                           | 12,5          |
| Номинальное выпрямленное напряжение, В                 | 36            |
| Диапазон регулирования выпрямленного напряжения, %     | 100           |
| Длительность полупериодной перегрузки по току, с       | 20            |
| КПД в номинальном режиме, %                            | 94,8          |
| Статическая погрешность стабилизации тока, %, не более | 1             |
| Габаритные размеры, (LxВxH), мм                        | 2400x850x1920 |
| Масса, кг  | 3200          |

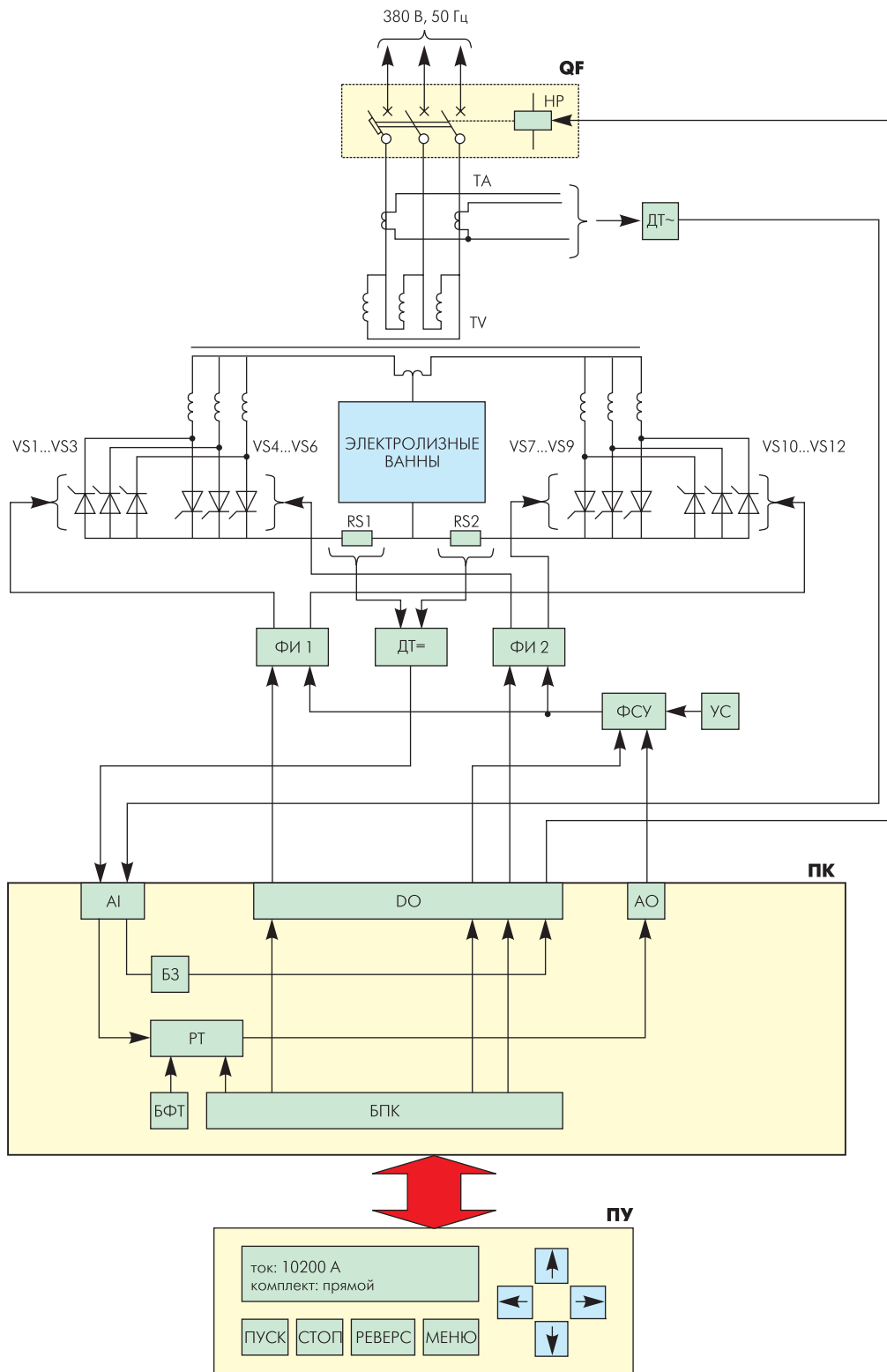


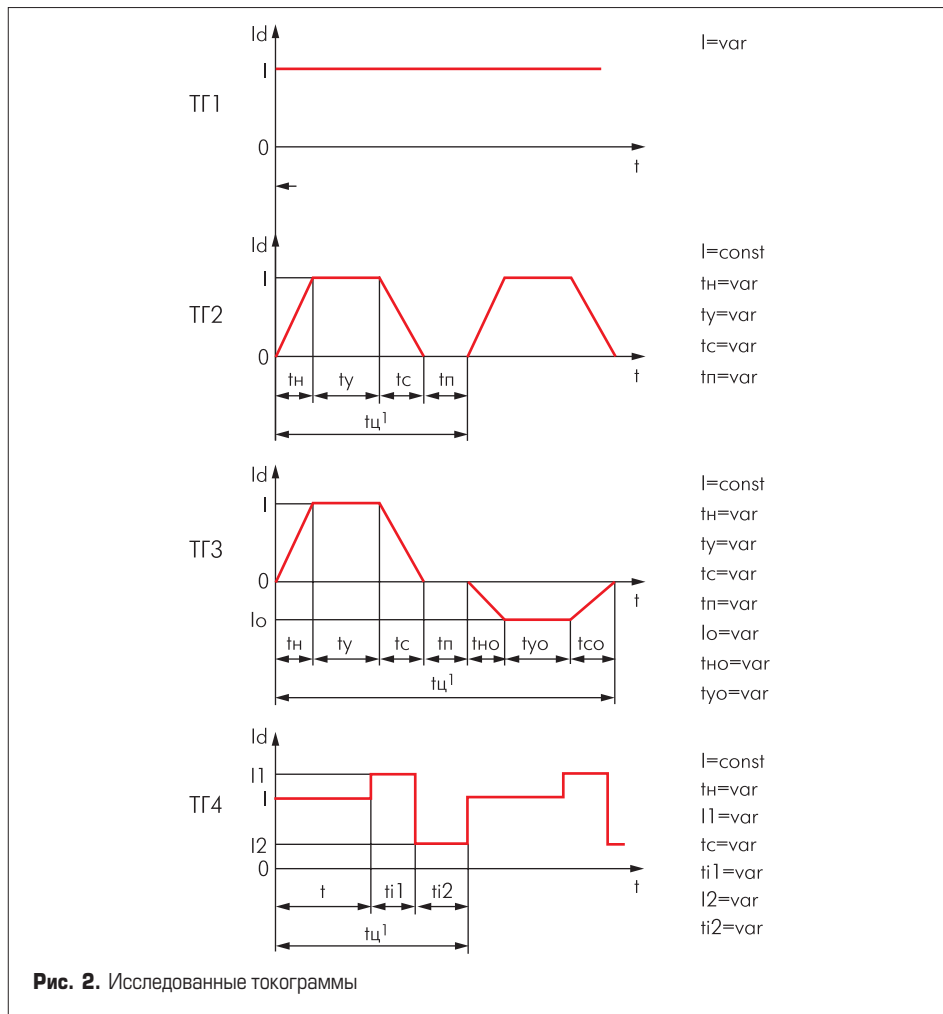
Рис. 1. Упрощенная функциональная схема агрегата для электролиза галлия

Исходя из приведенных выше требований, наиболее целесообразно в качестве СПП применить электротехническую систему «трансформатор — реверсивный тиристорный выпрямитель» (Т-РТВ). Трехфазный трансформатор имеет первичную обмотку, соединенную в треугольник, и две вторичные обмотки, соединенные по схеме «две обратные звезды с уравнивающим реактором». Полупроводниковый преобразователь представляет собой реверсивный выпрямитель, выполненный по двойной нулевой схеме. Такое схемное решение обусловлено низким выпрямленным напряжением (не более 48 В) и большим вы-

прямым током (до 12,5 кА). Однако такое сочетание выходных параметров РТП обуславливает повышенное падение напряжения от коммутационного тока на участке перекрытия тиристоров. Это вызывает увеличение габаритной мощности преобразовательного агрегата и тока в первичной обмотке силового трансформатора TV (рис. 1).

Поэтому при разработке конструкции преобразовательного агрегата по системе Т-РТВ решалась одна из важных задач — снижение внутреннего падения напряжения, минимизация потерь как в самом преобразовательном агрегате, так и питающей сети за счет

уменьшения индуктивного и активного сопротивлений контура коммутации. Она была решена путем создания совмещенного модуля «силовой трансформатор — тиристорный выпрямитель», что является одной из основных отличительных особенностей этого агрегата от аналогичных. Снижение индуктивного сопротивления контура коммутации и снижение активного сопротивления обмоток трансформаторов достигается за счет применения однофазных трансформаторов с кольцевыми магнитопроводами, охватывающими вертикальные элементы вентиляционных обмоток, что обеспечивает лучшее потоко-



сцепление между обмотками трансформаторов, меньшую длину магнитных силовых линий и стабильность характеристик кольцевых магнитопроводов по всей длине. Снижение сопротивлений отводов вентильных обмоток трансформаторов достигается за счет установки тиристоров на вертикальных элементах вентильных обмоток трансформаторов непосредственно на выходе из кольцевого магнитопровода. Сильноточные вентильные обмотки выполнены из водоохлаждаемых шин, что позволяет уменьшить диаметр магнитопроводов и, следовательно, массу магнитопроводов и потери в них. Шины вентильных обмоток образуют жесткую сварную конструкцию и являются несущим элементом модуля «силовой трансформатор — тиристорный выпрямитель» [7].

В преобразовательном агрегате можно выделить силовую часть, систему импульсно-фазового управления и управляющий программируемый контроллер (ПК).

Силовая часть агрегата содержит трансформатор TV, тиристоры прямого комплекта VS1–VS3, VS10–VS12, тиристоры обратного комплекта VS4–VS9. Трансформатор подключен к сети через выключатель QF.

Система импульсно-фазового управления включает: фазосдвигающее устройство ФСУ, узел синхронизации УС, формирователи импульсов прямого и обратного комплектов ФИ1, ФИ2. Узел синхронизации (один на каждый канал ФСУ) предназначен для привязки устройства фазового управления к сетевому напряжению и состоит из трансформатора

синхронизации и активного фильтра, осуществляющего защиту ФСУ от помех в синхронизирующем напряжении.

Устройство фазового управления ФСУ состоит из трех каналов, предназначенных для выработки шести последовательностей прямоугольных импульсных напряжений.

В каждый канал устройства входят нуль-ограны НО, определяющий моменты перехода напряжения синхронизации через «ноль», генератор пилообразного напряжения ГПН, устройство сравнения и распределения, осуществляющее сдвиг импульсов управления в зависимости от напряжения на выходе регулятора тока и распределение их по каналам. Формирователь длительности ФД, выполненный по схеме одновибратора, формирует необходимую длительность импульсов управления. Также в составе ФСУ предусмотрен узел запрета УЗ, в функцию которого входит осуществление сдвига импульсов управления в  $\beta \text{min}$  или их запрет. Формирователи импульсов ФИ1 и ФИ2 осуществляют потенциальное разделение и усиления сигнала по мощности.

В ПК сформированы следующие функциональные блоки:

- защиты БЗ;
- формирования токограммы БФТ;
- переключения комплектов БПК;
- регулятор тока РТ.

Задание режимов работы агрегата производится с дистанционного пульта управления ПУ с буквенно-цифровой индикацией. В качестве датчиков тока нагрузки применены измерительные преобразователи, под-

ключенные к шунтам. Связь между ПК и объектом регулирования осуществляется через аналоговые входы АИ, дискретные входы (на функциональной схеме не показаны), аналоговые выходы АО и дискретные выходы ДО. Применение контроллера дает возможность формирования токограммы сложной формы, необходимой по условиям технологии. Связь с системами верхнего уровня осуществляется по интерфейсу RS-485 с использованием стандартного протокола PROFIBUS DP или по протоколу, определяемому пользователем.

Преобразователь имеет следующие виды защит:

- от превышения температуры охладителей силовых тиристоров выше допустимой ( $75^\circ\text{C}$ );
- от перегрузки по току нагрузки;
- от внутреннего короткого замыкания в силовой части ПТР;
- от пробоя изоляции в силовом трансформаторе;
- от короткого замыкания в цепях питания системы управления;
- от неисправности в цепях внешней блокировки.

Токовая защита содержит два канала: максимальной токовой защиты (МТЗ) и перегрузки. Сигнал поступает с датчика тока ДТ, при возрастании тока выше установки ( $2 I_{\text{ном}}$ ) срабатывает программный компаратор и выдает аварийный сигнал «МТЗ». При этом происходит блокировка регулятора тока и сдвиг импульсов управления в  $\beta \text{min}$ , чем достигается уменьшение аварийного тока и облегчается режим коммутации силового выключателя, а последний отключает силовую часть ПТР от сети. На время переходных процессов в трансформаторе при включении преобразователя предусмотрена блокировка МТЗ. При перегрузках по току выше  $1,1 I_{\text{ном}}$  начинает работать канал защиты от перегрузки: при перегрузках по току на уровне  $1,5 I_{\text{ном}}$  ПТР работает в течение 60 с, после чего происходит выдача аварийного сигнала «Перегрузка» и происходят действия, аналогичные действиям по сигналу «МТЗ» [5].

Эффективность электролитической схемы концентрирования галлия определяется расходом электроэнергии. Он зависит от оптимизации ряда параметров: состава электролита, температуры, плотности тока, и других. Расширение производства галлия и увеличение тарифов на электроэнергию обусловило необходимость снижения энергозатрат на производство галлия. Был проведен комплекс экспериментальных исследований по поиску наиболее оптимальных режимов ведения технологического процесса. Исследования проводились по следующим направлениям: изменение состава электролита и температуры, изменение конструкции электролизера, изменение формы тока в электролизере и его плотности. К основным недостаткам ведения электролиза галлия на постоянном токе относится рыхлость катодного осадка и слабое сцепление его с катодом. Данное обстоятельство ведет к потере осадка из-за его осыпания с катода и растворения в элект-

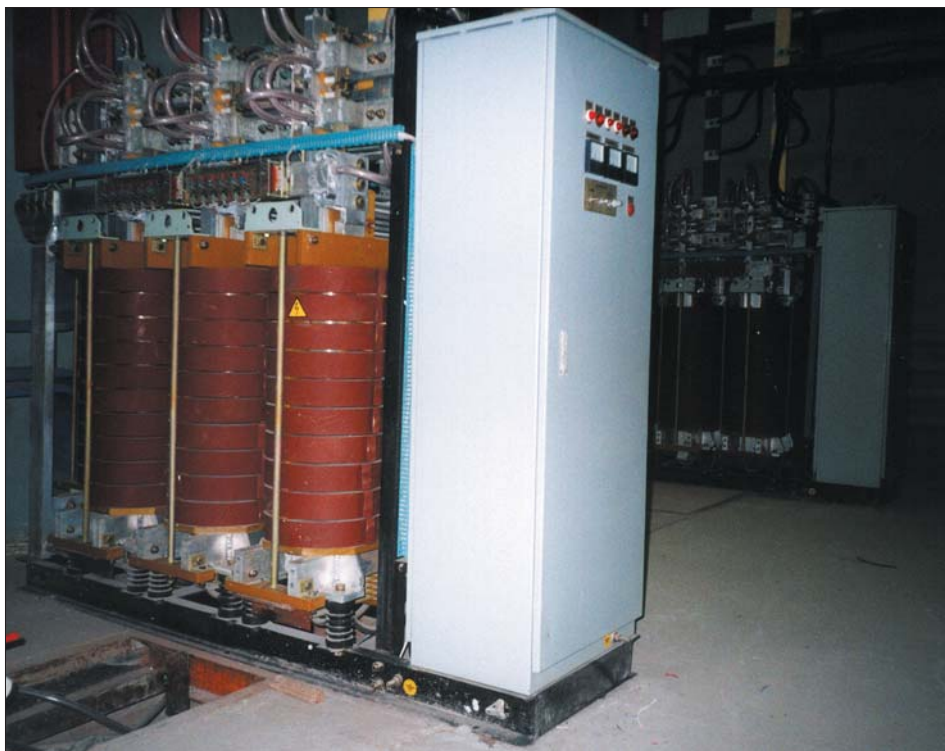


Рис. 3. Преобразовательные агрегаты ПТР12500/36 УХЛ4

Таблица 2. Итоговые технико-экономические показатели промышленных испытаний

|   | Мероприятие   | Показатель                       | Ед. изм.                           | Величина |      |
|---|---|----------------------------------|------------------------------------|----------|------|
| 1 | Совершенствование конструкции преобразователя                       | КПД                              | Типовая система                    | %        | 89   |
|   |   |                                  | Разработанная и внедренная система | %        | 94,8 |
| 2 | Оптимизация процесса электролиза                                    | Экономия электроэнергии          | %                                  | 8,3      |      |
| 3 | Оптимизация процесса растворения                                    | Сокращение времени               | мин                                | 12       |      |
|   |   |                                  | %                                  | 30       |      |
| 4 | Применение энергосберегающего алгоритма управления преобразователем | Увеличение выхода галлия по току | %                                  | 8        |      |

ролите. Поэтому исследовались следующие виды токограмм (рис. 2): постоянный выпрямленный ток, трапециевидная токограмма, трапециевидная токограмма с реверсом, постоянный выпрямленный ток с наложением импульсов прямоугольной формы.

Для каждого режима оценивалась эффективность технологического процесса, количественно определяемая как процентное отношение разницы между исходной и конечной концентрациями галлия в растворе к исходной:  $\Theta = [(K_{исх} - K_{кон})/K_{исх}] \times 100\%$ . Электрические режимы моделировались

на ЭВМ с использованием разработанной математической модели. Был определен энергоэффективный алгоритм управления, позволяющий уплотнить катодный осадок и сократить за счет этого потери галлия, а также уточнен ряд параметров ведения процесса в целом [2, 5].

Два преобразовательных агрегата ПТР12500/36 УХЛ4 изготовлены ОАО «Российская электротехническая компания» и запущены в эксплуатацию в ООО «Галлий» в 2001 году [5]. Фото агрегата, установленного в машзале ООО «Галлий», представлено на рис. 3.

Итоговые технико-экономические показатели внедрения реверсивного тиристорного преобразователя для электролиза галлия приведены в таблице 2.

Реализация в конструкции преобразовательного агрегата технических решений, обеспечивших снижение потерь электроэнергии, массогабаритных и стоимостных показателей, применение энергосберегающих алгоритмов управления током в цепи электролизеров и применение микропроцессорной системы управления обеспечили высокую эффективность технологического процесса электролиза галлия и использования энергетических ресурсов.

### Литература

1. Яценко С. П., Рубинштейн Г. М., Диев В. Н. и др. Электролитический способ производства галлия / В кн. «Фундаментальная наука — народному хозяйству». М.: Наука. 1990.
2. Бобков А. В. Разработка и исследование системы «трансформатор — управляемый выпрямитель» для электролиза галлия. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2002.
3. Бобков В. А., Бобков А. В., Копырин В. С. Силовая преобразовательная техника для мощных электротехнических установок постоянного тока // Компоненты и технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.
4. Шаблаков В. С., Кузнецов А. В., Лисин В. Р., Садовников В. Б., Бобков А. В., Бобков В. А., Яценко С. П., Рубинштейн Г. М., Копырин В. С. Модернизация оборудования для электролиза галлия // Промышленная энергетика. 1999. № 9.
5. Бобков А. В., Бобков В. А., Копырин В. С. Система «трансформатор — управляемый выпрямитель — электролизер галлия» // Промышленная энергетика. 2003. № 3.
6. Бобков А. В., Бобков В. А., Копырин В. С. Математическая модель и схема замещения электролизера галлия // Промышленная энергетика. 2003. № 3.
7. Патент 2173005 (РФ). Полупроводниковый преобразователь. А. В. Бобков, О. А. Неумин. Опубл. 27.08.2001. Бюл. № 24.