

Силовая преобразовательная техника

для мощных электротехнологических установок постоянного тока

В статье дается краткий обзор силовых управляемых выпрямителей для различных электротехнических установок.

**Владимир Бобков,
Александр Бобков**

bobkov_a@mail.ru

Владимир Копырин

Kamen@mail.ur.ru

Силовая преобразовательная техника широко используется в мощных электротехнологических установках (ЭТУ) постоянного тока [1–4]. В качестве источников постоянного тока применяются различные преобразовательные агрегаты (ПА) по системе «трансформатор — выпрямитель» (Т-В). Поскольку ПА, как правило, большой мощности, то число выпрямителей, используемых в них, часто больше одного, а преобразовательные трансформаторы (ПТ) выполняются с расщепленными вторичными обмотками. Выходные параметры ПА — выпрямленное напряжение ($U_{d_{па}}$) и ток ($I_{d_{па}}$) — требуют регулирования в определенном диапазоне в зависимости от ЭТУ.

Основные энергоемкие технологические процессы, установки постоянного тока и соответствующие им электрические параметры приведены в таблицах 1 и 2. Наиболее распространенными нагрузками постоянного тока являются электролизеры и гальванотехника. В последнее время расширяется внедрение дуговых печей постоянного тока (ДПТ). Из таблицы 1 видно, что величины выпрям-

ленных токов и напряжений изменяются в широких пределах.

Приведенные в таблице 1 ЭТУ можно разделить на ряд групп по виду вольт-амперных статических характеристик (ВАХ). Наиболее характерные ВАХ ЭТУ приведены на рис. 1.

К первой группе ЭТУ относятся электролизеры, имеющие монотонно возрастающие ВАХ с противоЭДС (см. рис. 1, линии 1, 2). Зависимость напряжения от тока и электрического сопротивления электролизера в общем виде может быть представлена следующим выражением:

$$U_{\Sigma} = E_{\Sigma} + I_{\Sigma}(R_{\Sigma ст} + R_{\Sigma дин}), \quad (1)$$

где U_{Σ} — напряжение на последовательной цепи (серии) электролизеров, E_{Σ} — противоЭДС цепи электролизеров, I_{Σ} — ток через электролизеры, $R_{\Sigma ст}$ — статическое сопротивление серии электролизеров, $R_{\Sigma дин}$ — динамическое сопротивление серии электролизеров.

Электролизеры, как правило, являются стабильной нагрузкой с медленно изменяющимися в значительных пределах параметрами. Исключение составляют электролизеры алюминия, в которых периодически возникают так называемые анодные эффекты. Во время анодного эффекта сопротивление $R_{\Sigma дин}$ и соответственно напряжение на одном электролизере увеличивается, в зависимости от типа электролизера и характера анодного эффекта, с 4,2–4,5 В до 25–40 В. Меньшее значение напряжения анодного эффекта относится к мощным электролизерам с предварительно обожженными анодами.

Таблица 1. Параметры постоянного тока различных установок

Технологический процесс, установка	Ток, кА	Напряжение, В
Электролиз галлия	6–12	12–48
Электролиз драгметаллов	0,5–2000	12–150
Гальванотехника	1,25–25	12–48
Электролиз меди	12–30	200–400
Электролиз никеля	12–30	100–600
Электролиз цинка	12–30	700–900
Электролиз алюминия	50–300	600–1200
Электролиз магния	100–120	200–600
Электролиз хлора	50–250	200–600
Дуговые печи постоянного тока	4,5–300	250–1200
Установки графитизации	20–250	160–300
Установки получения поликристаллического кремния	2–6	900–1000

Таблица 2. Удельный расход электроэнергии на электролиз различных металлов

Металл	Удельный расход, кВт·ч/т
Цинк	3200–3300
Марганец	7000–8000
Никель	1700–3700
Медь	320–360
Алюминий	13000–16000
Магний	13000–14000
Галлий	5190000

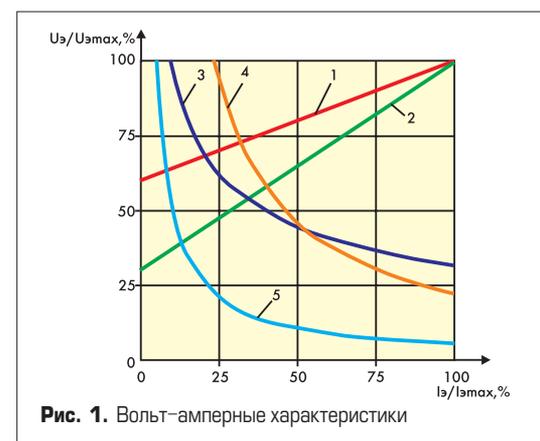


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики

Вторая группа нагрузок имеет падающие вольт-амперные характеристики, когда с ростом тока напряжение на них снижается. К ним относятся дуговые печи постоянного тока, установки графитизации, установки получения поликристаллического кремния (см. рис. 1, кривые 3–4). Вольт-амперная характеристика дуговой печи постоянного тока может быть выражена уравнением Айртона [5]:

$$U_d = \alpha + \beta I + \frac{\gamma + \delta I}{I_d}, \quad (2)$$

где α , β , γ и δ — постоянные, зависящие от материалов электродов, состава газа и условий охлаждения дуги; l — длина дуги.

Получение поликристаллического кремния производится в вакуумных реакторах путем восстановления его из парогазовой смеси, основу которой составляет трихлорсилан, водородом. Восстановленный кремний осаждается на установленных в реакторе стержнях-заготовках, разогреваемых электрическим током. По мере осаждения кремния диаметр стержней увеличивается с 5–7 мм до 120–140 мм, что и обуславливает вид вольт-амперной характеристики.

Графитизация углеродистого вещества — это процесс упорядочения атомов графита под воздействием высоких температур. Процесс графитизации электродных заготовок производится в электрических печах сопротивления. Различают два вида печей сопротивления: косвенного нагрева и прямого нагрева. В печах прямого нагрева ток пропускается непосредственно по заготовкам, сопротивление которых по мере процесса графитизации уменьшается в 3–4 раза, что вынуждает снижать напряжение и увеличивать ток.

Наиболее сложной ВАХ обладают электролизеры галлия, обусловленной существенной нелинейностью. Статическая ВАХ электролизера галлия описывается уравнением [6]:

$$U_{\Sigma} = E_{\Sigma} + I_{\Sigma}(R_{\Sigma_{ст}} + R_{\Sigma_{дин}}) + K_{R1} I_{\Sigma}^2 + K_{R2} I_{\Sigma}^3 + K_{R3} I_{\Sigma}^4 \quad (3)$$

где K_{R1} , K_{R2} , K_{R3} — эмпирические коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями и объемом электролизера.

Исходя из особенностей технологического процесса можно сформулировать следующие требования к источникам питания для ЭТУ: высокая надежность; максимально возможный КПД; минимизация потребления реактивной мощности; электромагнитная совместимость с питающей сетью; возможность автоматической отработки заданного технологического параметра (тока, напряжения, мощности, количества электричества и пр.); удобство эксплуатации.

Требование надежности диктуется необходимостью бесперебойного питания ЭТУ. Надежность ПА определяется надежностью входящих в него комплектующих изделий, прежде всего, преобразовательного трансформатора и выпрямительных блоков. Однако отказы в работе агрегатов зачастую возникают из-за ненадежности вспомогательного оборудования: вентиляторов, теп-

лообменников, датчиков и т. д. Так как надежность входящих в преобразовательный агрегат комплектующих изделий имеет конечное значение, бесперебойность питания ЭТУ может быть обеспечена только установкой резервных преобразовательных агрегатов (горячий или холодный резерв). С надежностью преобразовательных агрегатов напрямую связаны эксплуатационные расходы и численность ремонтного персонала.

Требование максимального КПД обусловлено параметрами ЭТУ, приведенными в таблицах 1 и 2. Оно реализуется рациональным построением системы электроснабжения, укрупнением единичной мощности преобразовательных трансформаторов и выпрямительных блоков, рациональным конструированием силовой части, совмещенной установкой преобразовательных трансформаторов и выпрямительных блоков.

Допустимая зона колебания технологических параметров ЭТУ достаточно узка и не может быть выдержана при ручном управлении. Удобство эксплуатации предполагает оснащение ПА средствами дистанционного оперативного управления и диагностики.

Типы преобразовательных агрегатов для электролиза и применяемые в них схемы выпрямления приведены в таблице 3.

Для получения достаточно стабилизированного тока диапазон плавного регулирования напряжения выпрямительных агрегатов, питающих серии электролизеров алюминия, должен лежать в пределах 40–50 В, для остальных электролизеров — не более 25–30 В. Увеличение диапазона плавного регулирования напряжения приводит только к неоправданному дополнительному потреблению реактивной мощности. Таким образом, требуемый диапазон плавного регулирования напряжения ПА для электролиза находится в пределах 3–7% от максимального напряжения серии электролизеров. Электролизеры расплавов

(алюминия, магния), разогреваемые протекающим по ним током, вводятся в работу по одному или небольшими группами. Поэтому преобразовательный агрегат должен обеспечивать снижение выпрямленного напряжения до 5–15 В. Это достигается применением трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) в сочетании с переключением диапазонов РПН без возбуждения (ПБВ). В трансформаторах с так называемым встроенным регулированием с РПН на стороне первичной обмотки снижение напряжения до требуемого по условиям пуска невозможно, поэтому требуется применение специальных пусковых схем.

Для питания электролизеров применяются в основном диодные либо тиристорные преобразовательные агрегаты, причем доля последних в мировой практике неуклонно возрастает. Тиристорные агрегаты обладают рядом достоинств: на сегодня стоимость тиристорных выпрямительных блоков и потери в них меньше, чем суммарная стоимость диодных выпрямительных с дросселями насыщения и потери в них; в трансформаторах тиристорных агрегатов достаточно иметь 5–7 ступеней РПН в рабочей зоне для ограничения диапазона плавного регулирования напряжения с целью снижения потребления реактивной мощности; пусковые режимы электролизеров алюминия и магния могут быть обеспечены путем фазового управления тиристорами. Опыт эксплуатации тиристорных агрегатов на Волховском и Богословском алюминиевых заводах, Норильском никеле, Южураникеле, а также дуговых печах, где условия эксплуатации значительно жестче, показал, что надежность тиристорных агрегатов вполне достаточна для применения их для питания электролизеров. Современные цифровые системы импульсно-фазового управления тиристорами обеспечивают, в отличие от ДН, равенство углов управления разных фаз, что исключает появление

Таблица 3. Преобразовательные агрегаты и схемы выпрямления различных установок

Технологический процесс, установка	Преобразовательный агрегат	
	Тип	Схема выпрямления
Электролиз галлия	Тиристорный реверсивный	Двойная нулевая с уравнительным реактором
Электролиз драгметаллов	Диодный; тиристорный с наложением переменной составляющей	Нулевая; мостовая; нулевая с обратным тиристором в одной фазе
Гальванотехника	Тиристорный; тиристорный реверсивный	Нулевая; двойная нулевая с уравнительным реактором
Цинкование стального листа	Тиристорный с фазоступенчатым регулированием напряжения	Двойная нулевая с уравнительным реактором
Электролиз меди, никеля	Диодный с РПН и ДН; тиристорный импульсный; тиристорный реверсивный	Двойная нулевая с уравнительным реактором; мостовая; мостовая двенадцатипульсная
Электролиз цинка	Диодный с РПН и ДН; диодный с РПН и ДН компенсированный	Мостовая двенадцатипульсная
Электролиз алюминия	Диодный с РПН и ДН; тиристорный с РПН; тиристорный с РПН компенсированный; тиристорно-диодный с РПН; ПИТ; диодный с РПН и фазоступенчатым регулированием напряжения	Двойная нулевая с уравнительным реактором; мостовая двенадцатипульсная; мостовая несимметричная
Электролиз магния, хлора	Диодный с РПН; диодный с РПН и ДН	Двойная нулевая с уравнительным реактором; мостовая двенадцатипульсная
Дуговые печи постоянного тока	Многомостовой тиристорный	Мостовая с переключением
Установки графитизации	Диодный с РПН	Мостовая
Установки получения поликристаллического кремния	Многомостовой тиристорный	Однофазная мостовая

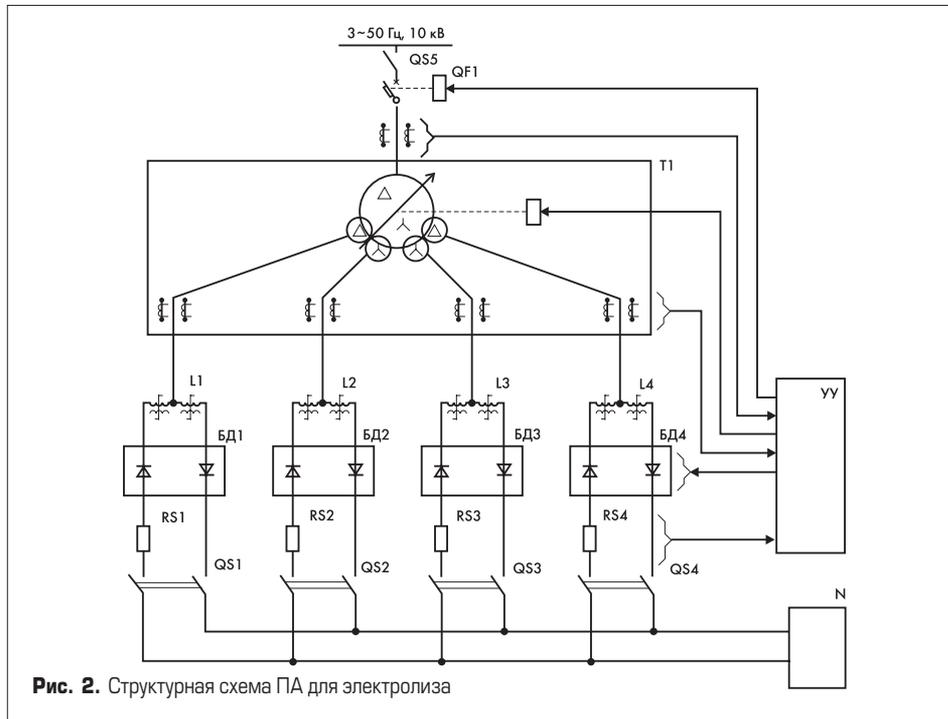


Рис. 2. Структурная схема ПА для электролиза

неканонических гармоник при повышении эквивалентной пульсности режима выпрямления преобразовательной подстанции. Наличие тиристорных агрегатов позволяет ограничивать аварийные токи сдвигом либо снятием импульсов управления, что особенно важно при параллельной работе агрегатов на одну нагрузку. Ссылки на недостаточный технический уровень эксплуатационного персонала, обслуживающего преобразовательные агрегаты, несостоятельны, так как в настоящее время значительную долю рядовых работников ППТ составляют выпускники вузов.

Тиристорные агрегаты позволяют реализовать в процессе электролиза токограммы сложной формы [1]. Их применение уменьшает уровень концентрационной поляризации, приводит к депассивации электродов и снижению электрического сопротивления электролизеров, препятствует образованию дендритов. В результате снижается удельный расход электрической энергии; увеличивается выход по току; улучшаются физические свойства катодного осадка; повышается чистота катодного осадка и степень извлечения химических элементов из растворов; интенсифицируется технологический процесс.

Параметрические источники тока (ПИТ) стабилизируют выпрямленный ток с сохранением значения коэффициента мощности, близкого к единице. Промышленное внедрение ПИТ осуществлено на опытных сериях электролизеров алюминия. Перспективным для преобразовательных подстанций электролизных производств является класс компенсированных выпрямителей с фильтрацией в коммутационные конденсаторы нечетнократных гармоник преобразовательных блоков.

При всем разнообразии средств компенсации реактивной мощности, улучшения спектров токов и напряжений ППТ эффективным является применение ПА с усложненными законами регулирования выпрямленного напряжения. К ним относятся многомостовые несимметричные преобразова-

тельные агрегаты с чередованием управляемых и неуправляемых анодных и катодных выпрямительных групп, а также агрегаты с переменной структурой силовой части. Эффективным средством улучшения энергетических характеристик преобразовательных агрегатов для ЭТУ является фазоступенчатый способ регулирования выпрямленного напряжения [7-9].

Структурная схема наиболее распространенного диодного ПА с дросселями насыщения и РПН приведена на рис. 2. Преобразовательный трансформатор Т1 подключен к сети 10 кВ посредством вводного автоматического выключателя QF1 и разъединителя QS5. Две части вторичной обмотки трансформатора Т1 соединены в «треугольник», а две в «звезду». К вторичной обмотке подключены дроссели насыщения L1...L4 и четыре выпрямительных блока БВ1...БВ4, которые подключены к шинам нагрузки через разъединители QS1...QS4. Управление и защита агрегата производится устройством управления УУ. Трансформаторы тока в обмотках трансформатора и шунты RS1...RS4 используются для измерения переменных и постоянных токов в соответствующих цепях.

Для нагрузок с падающей вольт-амперной характеристикой целесообразно применение агрегатов с переменной структурой силовой части. Рассмотрим принципы построения таких агрегатов на примере источника пита-

ния установки получения поликристаллического кремния, являющегося исходным материалом для производства полупроводников. Стержни-заготовки, на которые производится осаждение кремния из газовой фазы, разбиты на три группы, каждая из которых запитывается от отдельной фазы напряжения. Схема силовой части одной фазы источника питания приведена на рис. 3. Она содержит силовой трансформатор Т1 с первичной обмоткой Н1, К1 и четырьмя одинаковыми частями вторичной обмотки, к каждой из которых подключены тиристорные выпрямители VZ1...VZ4. Одноименные выводы выпрямителей соединены параллельно и подключены к нагрузке R1. Части вторичных обмоток включены последовательно через ключи КМ1...КМ3. При замкнутых ключах КМ1...КМ3 напряжения вторичных обмоток складываются. В работе остается пара тиристорных, подключенных к выводам n1 и k4. Напряжение на нагрузке максимально, а допустимый ток в таком режиме составляет $0,25 I_{max}$. При размыкании ключа КМ2 вступают в работу тиристоры, подключенные к выводам вторичной обмотки k2 и n3. Ток нагрузки удваивается, а напряжение уменьшается в два раза. При размыкании всех ключей КМ1...КМ3 выпрямители VZ1...VZ4 оказываются включенными параллельно. Ток нагрузки при этом максимальный, а напряжение снижается до $0,25 U_{max}$. На практике ключи КМ1...КМ3 выполняются бесконтактными на встречно-параллельных тиристорах. В таком случае представляется возможным реализовать фазоступенчатое регулирование выпрямленного напряжения.

На таких же принципах строятся преобразовательные агрегаты для печей графитизации и дуговых печей постоянного тока, однако их схемная реализация отличается от приведенной выше (см. табл. 3). Количество частей вторичных обмоток трансформатора и подключенных к ним выпрямителей определяется заданной вольт-амперной характеристикой технологического агрегата.

Преобразовательные подстанции постоянного тока (ППТ) являются мощными потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник в питающую сеть. Реактивная мощность обуславливает дополнительные потери в элементах электрической цепи и увеличение габаритной мощности трансформаторов. Обеспечение электромагнитной совместимости ППТ в соответствии с требованиями нормативных документов — наиважнейшая задача при проектиро-

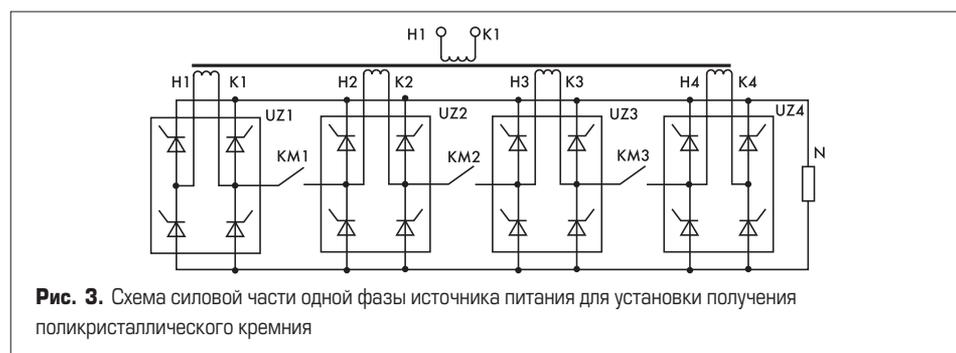


Рис. 3. Схема силовой части одной фазы источника питания для установки получения поликристаллического кремния

Ток нагрузки при этом максимальный, а напряжение снижается до $0,25 U_{\max}$. На практике ключи КМ1...КМ3 выполняются бесконтактными на встречно-параллельных тиристорах. В таком случае представляется возможным реализовать фазоступенчатое регулирование выпрямленного напряжения.

На таких же принципах строятся преобразовательные агрегаты для печей графитизации и дуговых печей постоянного тока, однако их схемная реализация отличается от приведенной выше (см. табл. 3). Количество частей вторичных обмоток трансформатора и подключенных к ним выпрямителей определяется заданной вольт-амперной характеристикой технологического агрегата.

Преобразовательные подстанции постоянного тока (ППТ) являются мощными потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник в питающую сеть. Реактивная мощность обуславливает дополнительные потери в элементах электрической цепи и увеличение габаритной мощности трансформаторов. Обеспечение электро-

магнитной совместимости ППТ в соответствии с требованиями нормативных документов — наиважнейшая задача при проектировании и эксплуатации преобразовательных подстанций. Основными техническими средствами компенсации реактивной мощности, улучшения спектров токов и напряжений ППТ являются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства в сочетании с увеличением эквивалентной пульсности режима выпрямления преобразовательных подстанций. При этом актуальным является повышение энергетических характеристик самих преобразовательных агрегатов.

Литература

1. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии / Под ред. М. Я. Басальгина, В. С. Копырина. М.: Металлургия. 1991.
2. Марков В. Ю., Бобков В. А. Преобразовательная техника, поставляемая Российской электротехнической компанией для алю-

миниевых заводов // Промышленная энергетика. 1999. № 9.

3. Малиновский В. С., Ярных Л. В. Дуговые печи постоянного тока нового поколения // Металлургия машиностроения. 2001. № 1.
4. Промышленная энергетика. 2003. № 3.
5. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева / Под ред. А. Д. Свенчанского. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат. 1981.
6. Бобков А. В., Копырин В. С. Математическая модель и схема замещения электролизера галлия // Промышленная энергетика. 2003. № 3.
7. Бобков А. В., Бобков В. А., Копырин В. С. Управляемый выпрямитель с фазоступенчатым регулированием выпрямленного напряжения для питания электролизеров // Промышленная энергетика. 2001. № 6.
8. Пат. 2106712 (РФ). Дроссель насыщения. В. А. Бобков, О. А. Неуймин. Оpubл. в Б. И. 1998. № 7.
9. Пат. 2189688 (РФ). Многофазный управляемый выпрямитель. А. В. Бобков, В. С. Копырин. Оpubл. в Б. И. 2002. № 26.