

Источник питания постоянного тока плавильной печи на базе трех однофазных выпрямителей

Показано, что из трех однофазных выпрямителей, имеющих тиристорные регуляторы в первичной цепи понижающих трансформаторов и неуправляемые вентильные мосты во вторичной цепи этих трансформаторов, можно создать источник питания постоянного тока плавильной печи. Такой источник питания обеспечивает высокую степень надежности работы устройства. Для расчета основных электрических величин применена методика расчета устройства на противо-ЭДС; найден диапазон возможных значений напряжений на печи, в котором метод справедлив.

Показано, що із трьох однофазних випрямлячів, що мають тиристорні регулятори в первинному ланцюзі понижуючих трансформаторів і некеровані вентильні мости у вторинному ланцюзі цих трансформаторів, можна створити джерело живлення постійного струму плавильної печі. Таке джерело живлення забезпечує високий ступінь надійності роботи пристрою. Для розрахунку основних електричних величин застосовано методика розрахунку пристрою на противо-ЕРС; знайдено діапазон можливих значень напруг на печі, у якому метод справедливий.

Введение. Электрошлаковые печи с нерасходуемым электродом являются перспективными плавильными агрегатами, используемыми для переплава шлаковых отходов ферросплавных производств [3], а также черных и цветных металлов и их сплавов, производства ферросплавов из руд методом восстановления (рудотермический метод), производства карбида кальция. Под воздействием протекающего постоянного тока через шлаковую ванну в ней выделяется тепло, необходимое для расплавления шихтовых материалов. При этом расплавленный металл химически взаимодействует со шлаком и содержание вредных компонентов (сера, фосфор и т.п.) значительно снижается.

Следует отметить, что основным требованием к источникам питания плавильных печей является обеспечение высокой степени надежности, так как внезапная остановка плавки из-за отказа источника питания приводит к существенным экономическим потерям. Как правило, для питания плавильной печи постоянным током используются трехфазные выпрямители с понижающим трехфазным трансформатором. Преимущественное применение находят две основные схемы: с тиристорным регулятором трехфазного напряжения, включенной на стороне сетевой обмотки трансформатора и неуправляемым выпрямителем; с управляемым выпрямителем на тиристорах, которая выполняется почти исключительно или по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором, или по трехфазной мостовой схеме [1, 2, 4, 5].

Мощность нагрева регулируется тиристорами в сочетании с переключением отводов на сетевой стороне силового трансформатора. Устройство переключения витков трансформатора под нагрузкой

требует специального ухода и изнашивается быстрее другого оборудования, в результате чего снижается надежность всего выпрямителя. Кроме того, трехфазные выпрямители имеют повышенную чувствительность к асимметрии фазовых сдвигов углов управления тиристором для разных фаз. Нарушение симметрии углов регулирования вызывает появление вынужденного намагничивания, приводящего к насыщению магнитопровода трансформатора [1]. Следует отметить также то, что при пробое тиристора в одной из фаз (если применяется выпрямитель с тиристорами, включенными в первичную обмотку трехфазного трансформатора) также происходит нарушение баланса магнитных потоков. При внутреннем коротком замыкании в трехфазном выпрямительном блоке (пробой одного из вентилей) сначала возникает двухфазное короткое замыкание с дальнейшим переходом в режим трехфазного короткого замыкания; в этот момент времени с помощью защитного устройства источник питания отключается от сети; происходит защита самого источника питания от аварийного режима, однако, при этом прерывается технологический процесс (в данном случае — плавка, которая намного дороже самого источника питания), что недопустимо.

Новая схема питания плавильной печи. Настоящая статья посвящена рассмотрению возможности создания источника питания плавильной печи, обеспечивающего требуемую надежность работы.

Источник питания (рис. 1) содержит три однофазных тиристорных регулятора $VS1—VS3$ в первичной цепи понижающих трансформаторов $T1—T3$ и неуправляемые вентильные мосты $VD1—VD3$

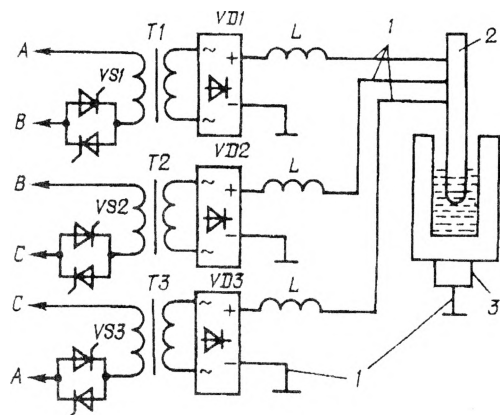


Рис. 1

во вторичной цепи этих трансформаторов. Входы каждого выпрямителя подключены через трансформаторы к соответствующему линейному напряжению трехфазной питающей сети, а выходы — через отдельные токопроводы 1 к нагрузке (к электродам 2, 3 плавильной печи), создавая на ней выпрямленное напряжение, имеющее пульсации, соответствующие шестифазной схеме выпрямления.

Предлагаемая схема не аналогична схеме с трехфазным трансформатором, с соединением обмоток Δ/Y_0 и выпрямителем, собранным по схеме Ларионова.

Главное отличие заключается в том, что токи в каждом из используемых однофазных трансформаторов не образуют трехфазную систему токов, понимаемую в обычном смысле. Токи в каждой фазе, в общем случае, имеют паузы между полуволнами прямой и обратной полярности. Благодаря такой форме обеспечивается почти полная загрузка ветвей (по времени) без использования реакторов, что удешевляет установку.

Для обеспечения нужного уровня индуктивности вторичного контура для такого режима работы достаточно выбрать кабели вторичной цепи схемы определенной длины.

Мощность печи регулируется изменением фазы включения тиристоров, установленных на первичной стороне трансформаторов.

Предлагаемое устройство имеет ряд преимуществ по сравнению с устройством с трехфазным выпрямителем.

Во-первых, значительно упрощается регулировка тока в электропечи. При незначительной глубине регулировки тока регулировать ток можно только в одной ветви, а две остальные ветви — выполнять нерегулируемыми.

Во-вторых, повышается надежность работы печи. Когда во время плавки происходит авария источника питания, то в случае, если источником питания является трехфазный выпрямитель, плавка прекращается, а содержимое печи бракуется, что приводит к большим экономическим потерям, поскольку содержимое печи значительно дороже стоимости силовой установки. В случае, когда установка

состоит из трех независимых ветвей, плавка продолжается при выходе из строя одной или двух ветвей (вероятность же выхода одновременно трех ветвей ничтожно мала). При этом длительность плавки увеличивается, но брака содержимого печи не происходит.

В-третьих, в случае особо важных плавки при выходе из строя силового источника питания необходимо иметь резервный источник. Очевидно, что при использовании трехфазного выпрямителя необходимо иметь такой же, а в случае предложенной схемы аппарата с тремя ветвями — достаточно иметь в резерве всего одну ветвь (треть мощности). Замена вышедшего из строя трансформатора или выпрямителя на резервный узел может быть осуществлена без прерывания процесса плавки.

Анализ работы новой схемы источника питания. Рассмотрим случай, когда индуктивность рассеяния трансформатора и индуктивность подводящих кабелей в сумме невелики и таковы, что ток в каждой ветви прерывистый, а ток в нагрузке не имеет пауз. При расчете тока пренебрегаем активными сопротивлениями во всех ветвях до нагрузки.

Работу схемы рассматриваем в установившемся режиме. Полагая все ветви установки идентичными, анализ проводим для режима работы однофазного выпрямителя с максимально возможным током электропечи и максимальным среднеквадратичным значением тока во вторичной обмотке трансформатора при естественной коммутации тиристоров.

Будем также считать, что напряжение, подаваемое на вход ветви, начиная с момента времени ($t=0$), синусоидально

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Минимальный угол включения тиристоров, с которого начинается расчет процесса нарастания тока (рис. 2)

$$\varphi = \arcsin(U_H / U_m). \quad (1)$$

Здесь U_m — амплитуда напряжения на выходе трансформатора; ω — угловая частота питающей

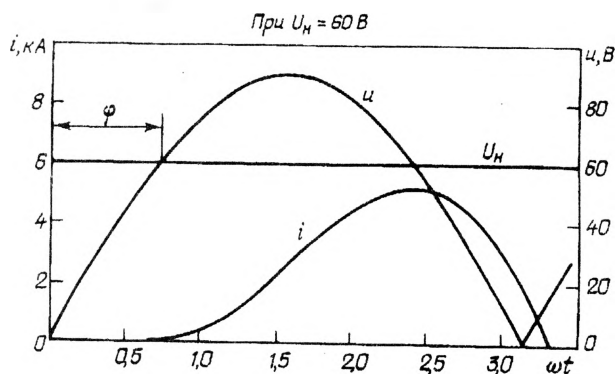


Рис. 2

сети; $U_{\text{н}}$ — напряжение на нагрузке (печи), рассматриваемое как прогиво-ЭДС.

Составим дифференциальное уравнение Кирхгофа для одной ветви силовой цепи источника питания

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{\text{н}} - \omega L di/d\omega t = 0, \quad (2)$$

где $L = L_s + L_{\text{н}}$ — суммарная индуктивность электрической цепи одной ветви устройства до и после выпрямителя; L_s — индуктивность рассеяния трансформатора; $L_{\text{н}}$ — индуктивность подводящих кабелей. Все ветви устройства идентичны.

Решение уравнения (2) при нулевых начальных условиях для тока можно представить в следующем виде:

$$i(\omega t, U_m, U_{\text{н}}, L) = \frac{U_m}{\omega L} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)] - \frac{U_{\text{н}} \omega t}{\omega L}. \quad (3)$$

Продифференцировав (3) по времени и приравняв полученное выражение нулю, находим угол, при котором наблюдается амплитуда тока

$$\omega t_m = 2 \arctg \left[\left(\frac{U_m}{U_{\text{н}}} \right)^2 - 1 \right]^{0.5}. \quad (4)$$

Максимальный ток одной ветви за полупериод

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L} [\cos \varphi - \cos(\omega t_m + \varphi)] + \frac{U_{\text{н}}}{\omega L} \omega t_m. \quad (5)$$

Приравняв выражение (3) нулю, из полученного трансцендентного уравнения находим средствами пакета *Mathcad* угол перехода тока через нуль

$$\omega t_0(U_m, U_{\text{н}}, L) = \text{root} [i(x, U_m, U_{\text{н}}, L), x]. \quad (6)$$

Токи в каждой из трех ветвей после выпрямителя определяются при следующих условиях:

$$i_1(\omega t) = \begin{cases} i(\omega t) & \text{при } 0 < \text{mod}(\omega t, \pi) < \omega t_0, \\ 0 & \text{при } \omega t_0 < \text{mod}(\omega t, \pi) < \pi, \end{cases} \quad (7)$$

$$i_2(\omega t) = \begin{cases} i(\omega t + 2\pi/3) & \text{при } 0 < \text{mod}[(\omega t + 2\pi/3), \pi] < \omega t_0, \\ 0 & \text{при } \omega t_0 < \text{mod}[(\omega t + 2\pi/3), \pi] < \pi, \end{cases} \quad (8)$$

$$i_3(\omega t) = \begin{cases} i(\omega t + 4\pi/3) & \text{при } 0 < \text{mod}[(\omega t + 4\pi/3), \pi] < \omega t_0, \\ 0 & \text{при } \omega t_0 < \text{mod}[(\omega t + 4\pi/3), \pi] < \pi, \end{cases} \quad (9)$$

где mod — функция, обозначающая остаток от деления текущего ωt на π .

Мгновенное значение суммарного тока в нагрузке определяется как сумма мгновенных значений токов в отдельных ветвях

$$i_{\text{н}}(\omega t) = i_1(\omega t) + i_2(\omega t) + i_3(\omega t). \quad (10)$$

На рис. 3 показаны токи во вторичных обмотках трансформатора разработанного источника. Мгновенные значения токов рассчитывались при напряжении на нагрузке, равном 60 В.

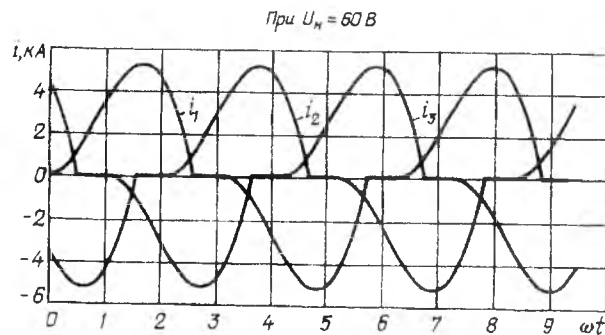


Рис. 3

Среднее и действующее значения суммарного тока в нагрузке и тока любой из ветвей находились по формулам

$$I_{\text{ср.н}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_{\text{н}}(\omega t) d\omega t, \quad I_{\text{н}} = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_{\text{н}}^2(\omega t) d\omega t \right]^{0.5},$$

$$I_{\text{ср.1}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_1(\omega t) d\omega t, \quad I_1 = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_1^2(\omega t) d\omega t \right]^{0.5},$$

а действующее значение тока в диоде моста

$$I_D = I_1.$$

Линейный ток сети при $U_{\text{н}} = 54 \text{ В}$ имеет вид, показанный на рис. 4. Коэффициент гармоник линейного тока значительно меньше, чем этот же коэффициент для схемы Лариопова с реактором.

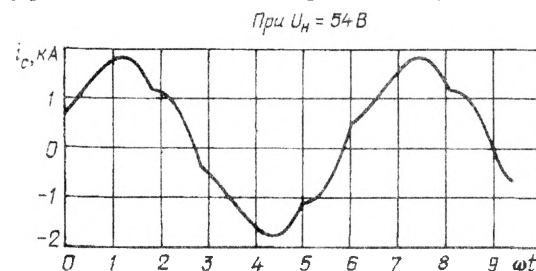
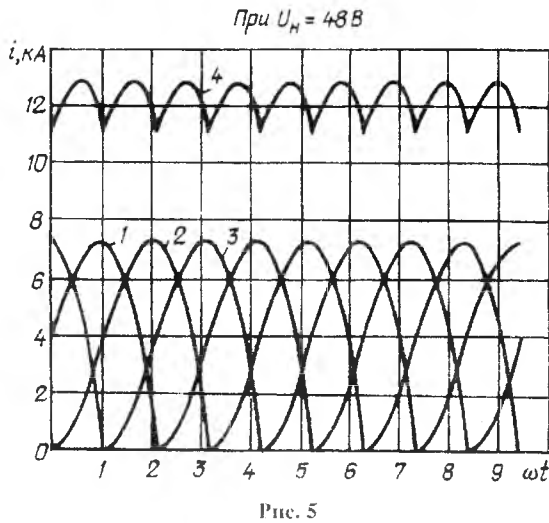


Рис. 4

В линейных токах отсутствуют гармоники нулевой последовательности. Значение $\cos \varphi$ предлагаемой установки при напряжении на нагрузке (печи) при $U_{\text{н}} = 48 \text{ В}$ близко к 0,75, а при $U_{\text{н}} = 60 \text{ В}$ — к 0,977.

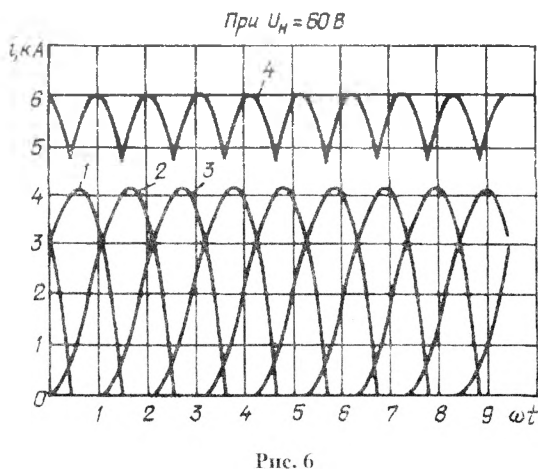
Вышеописанная методика расчета устройства справедлива только в том случае, когда токи одной ветви не перекрываются.

На диаграмме, показанной на рис. 5, приведен граничный случай, когда токи одной ветви еще не перекрываются, но пауза отсутствует. Здесь кроме



токов ветвей дан также суммарный ток в нагрузке при $U_H = 48 \text{ В}$.

На рис. 6 показана диаграмма токов ветвей, а также суммарный ток в нагрузке при $U_H = 60 \text{ В}$. Этот случай обычно применяется на практике при использовании промышленных источников. Как видно из диаграммы, токи разных ветвей перекрываются, а токи отдельных ветвей имеют паузы.



Методика не применима также и в том случае, когда токи разных ветвей не перекрываются. Так как длительность тока одной ветви за полупериод при неизменном напряжении U_m зависит только от напряжения нагрузки U_H , то границы диапазона возможных значений U_H , в котором метод справедлив, равны

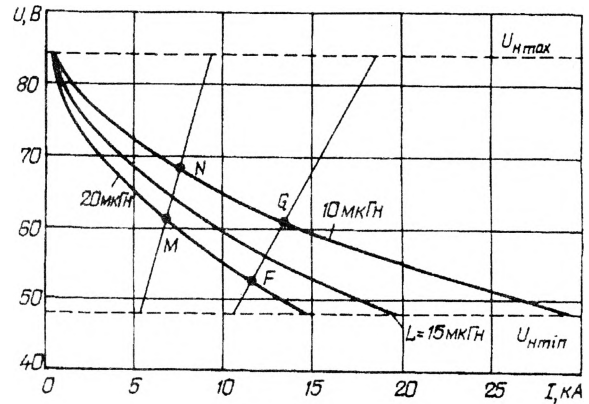
$$U_{H.\min} = \text{root} \left[\omega t_0 (U_m, u, L) - \pi, u \right], \quad (11)$$

$$U_{H.\max} = \text{root} \left[\omega t_0 (U_m, u, L) - \pi/3, u \right]. \quad (12)$$

На рис. 7 проказано семейство вольтамперных характеристик (ВАХ) $U_H = f(I_H)$ рассматриваемого устройства, построенное по полученным формулам для значений L : $L_1 = 10 \text{ мкГн}$ (кривая 1); $L_2 = 15$

мкГн (кривая 2); $L_3 = 20 \text{ мкГн}$ (кривая 3).

Устройство подсоединено к трехфазной сети с напряжением $U = 380 \text{ В}$ и коэффициентом трансформации каждого силового трансформатора $k_{\text{тр}} = 6$. Для этого случая построено семейство ВАХ, когда максимальное значение напряжения на выходе выпрямителя каждой ветви составляет $U_m = 89,5 \text{ В}$.



На оси абсцисс отложено среднее значение тока в нагрузке в кА, а на оси ординат — среднее напряжение на нагрузке в В. Как видно из графиков, характеристики при больших значениях L более крутопадающие.

На графике показаны также две нагрузочные прямые при работе схемы на омическое сопротивление (балластное): левая (прямая 4), все точки которой соответствуют активному сопротивлению нагрузки $0,01 \text{ Ом}$, правая (прямая 5) — $0,005 \text{ Ом}$.

Точки пересечения прямой ($R_H = 0,01 \text{ Ом}$) с вольтамперными характеристиками: M соответствует $U_H = 6,1 \text{ В}$, $I_{\text{ср.н}} = 6,68 \text{ кА}$; N соответствует $U_H = 68 \text{ В}$, $I_{\text{ср.н}} = 7,48 \text{ кА}$.

Точки пересечения прямой ($R_H = 0,005 \text{ Ом}$) с вольтамперными характеристиками: F соответствует $U_H = 52,5 \text{ В}$, $I_{\text{ср.н}} = 11,53 \text{ кА}$; G соответствует $U_H = 60 \text{ В}$, $I_{\text{ср.н}} = 13,4 \text{ кА}$.

Эти уровни токов и напряжений вполне достаточны для нормальной работы печи.

Максимальный ток одной ветви, рассчитанный по формуле (5), в рассматриваемых четырех точках ВАХ равен соответственно

$$I_{mM} = 4,92 \text{ кА}, \quad I_{mN} = 6,43 \text{ кА},$$

$$I_{mF} = 7,31 \text{ кА}, \quad I_{mG} = 9,85 \text{ кА}.$$

Из приведенных данных следует, что средний ток нагрузки и максимальный ток в ветви увеличиваются с уменьшением индуктивности L . Так при уменьшении L от $L_3 = 20 \text{ мкГн}$ до $L_1 = 10 \text{ мкГн}$ при активном сопротивлении нагрузки $R_H = 0,01 \text{ Ом}$, ток нагрузки увеличился на $11,8\%$ (с $6,68 \text{ кА}$ до $7,48 \text{ кА}$), а максимальный ток в ветви увеличился

на 30,6% (с 4,92 кА до 6,43 кА). Очевидно, что такой увеличенный максимальный ток ветви приводит к возрастанию габаритов и стоимости выпрямителей при уменьшении индуктивности L . Поэтому расчет режимов работы системы питания должен выполняться комплексно с учетом всех факторов.

Анализ выражений (11) и (12) показывает, что вышеописанная методика расчета устройства на противо-ЭДС справедлива только при следующих отношениях среднего напряжения на нагрузке к амплитуде напряжения на выходе трансформатора:

$$0,537 \leq (U_{II} / U_m) \leq 0,94. \quad (13)$$

Рассмотрим два режима работы устройства:

а) $U_m = 89,5$ В; $R_{II} = 0,005$ Ом; $L_3 = 20$ мкГн. При полном угле включения тиристоров в устройстве установятся следующие напряжения и токи: $U_{II} = 52,5$ В; $I_{II} = 11,54$ кА; $I_1 = 4,65$ кА; $I_1 / I_{II} = 0,4$;

б) $U_m = 89,5$ В; $R_{II} = 0,01$ Ом; $L_3 = 20$ мкГн. $U_{II} = 60$ В; $I_{II} = 6,7$ кА; $I_1 = 2,9$ кА; $I_1 / I_{II} = 0,43$.

Мощность, выделяемая в нагрузке,

$$P = U_{II} I_{II}; \quad P_a = 605,9 \text{ кВт}; \quad P_b = 408,8 \text{ кВт}.$$

Действующее напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = U_m / \sqrt{2} = 63,3 \text{ В}.$$

Мощность одной ветви (установленная мощность одного трансформатора)

$$P_1 = U_m I_1 / \sqrt{2}; \quad P_{1a} = 294,8 \text{ кВт}; \quad P_{1b} = 184,2 \text{ кВт}.$$

Мощность устройства (установленная)

$$P_y = 3P_1; \quad P_{ya} = 884,4 \text{ кВт}; \quad P_{yb} = 552,6 \text{ кВт};$$

Как видно из приведенных примеров, чем больше среднее напряжение печи U_{II} , тем меньше ток и мощность, выделяемая в нагрузке, что обусловлено падающей ВАХ печи. Необходимо также отметить, что если активное сопротивление рас-

плава возрастает, то среднее напряжение печи также возрастает. Мощность, выделяемая в печи, составляет большую часть мощности установки в случае, когда сопротивление расплава больше. Так, в режиме а) мощность, выделяемая в печи, составляет 68,5%, а в режиме б) — 74% от установленной мощности устройства.

Выводы. Источник питания с групповым трехфазным трансформатором и тремя однофазными выпрямителями отличается простой регулировкой тока электропечи, повышенной надежностью работы и простотой при обслуживании и ремонте.

Наиболее используемым режимом работы источника питания является такой режим, при котором токи разных ветвей перекрываются, а токи каждой из ветвей имеют паузы.

Анализ семейства вольтамперных характеристик показывает, что крутизна этих характеристик возрастает с увеличением индуктивности, причем при одном и том же токе в нагрузке напряжение на нагрузке меньше при большем значении индуктивности.

В предложенном источнике питания существенно упрощается схема управления тиристорами для регулировки тока, так как работа всех фаз устройства не взаимосвязана.

Рассмотренная система питания печи характеризуется небольшим искажением линейного тока, потребляемого из сети.

1. Васильев А.С., Гуревич С.Г. и др. Источники питания электротермических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.

2. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 232 с.

3. Проскудин В.Н., Болотаивили А.А., Сапон В.И. и др. Электрошлаковая установка для производства ферросилиция методом переплава шлаковых отходов // Сварщик. — 2006. — № 4. — С. 26—29.

4. Электрооборудование и автоматика электротермических установок (справочник). — М.: Энергия, 1978. — 304 с.

5. Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем. / Под ред. В.А.Лабушова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 464 с.

Надійшла 19.06.2007