

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра электротехники и микропроцессорной электроники

Г.А. Фарнасов

# Электротехника, электроника, электрооборудование

Электротехника

Учебник

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению Металлургия



ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ

Москва 2012

УДК 621.3  
Ф76

Рецензенты

д-р техн. наук, проф., академик РАН *В.П. Рубцов*;  
кафедра АТПМиМ Московского государственного  
вечернего металлургического института  
(зав. каф. канд. техн. наук *Е.Ф. Анисимов*)

**Фарнасов, Г.А.**

Ф76 Электротехника, электроника, электрооборудование : электротехника : учебник / Г.А. Фарнасов. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. – 423 с.

ISBN 978-5-87623-602-9

Учебник по курсам «Электротехника, электроника, электрооборудование» соответствует программам для студентов металлургических специальностей при подготовке инженеров, бакалавров и магистров, а также других неэлектротехнических специальностей. Он включает разделы: электротехника, электроника, электрооборудование, материал которых изложен на примерах электротехнических установок и электропривода основных металлургических аппаратов. Приведены упражнения, темы домашних заданий, методы расчетов при выполнении выпускной квалификационной работы, дипломного проекта.

Предназначен для студентов специальностей: 150101 «Металлургия черных металлов»; 150102 «Металлургия цветных металлов»; 150103 «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей»; 150104 «Технология литейного производства»; 150109 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов»; 130405 «Обогащение полезных ископаемых»; 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств»; 080801 «Прикладная информатика в энергосбережении».

Может быть полезен работникам промышленных предприятий.

УДК 621.3

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Цепи постоянного тока .....</b>	<b>9</b>
1.1. Особенности нагрева материалов энергией постоянного тока.....	9
1.2. Элементы и режимы работы электрических цепей.....	21
1.3. Методы расчета линейных электрических цепей.....	31
1.4. Нелинейные цепи постоянного тока.....	38
1.5. Измерения в цепях постоянного тока.....	45
1.6. Упражнения по теме «Цепи постоянного тока».....	54
1.7. Домашнее задание № 1 «Расчет электрических параметров дуговой плавильной печи постоянного тока».....	75
<b>2. Однофазные цепи синусоидального тока .....</b>	<b>76</b>
2.1. Особенности применения энергии однофазного переменного тока.....	76
2.2. Электрическая цепь с $R$ -элементом .....	100
2.3. Электрическая цепь с $L$ -элементом .....	103
2.4. Электрическая цепь с $C$ -элементом.....	105
2.5. Электрическая цепь при последовательном соединении $R$ - и $L$ -элементов.....	108
2.6. Мощность в электрической цепи с $R$ - и $L$ -элементами.....	111
2.7. Электрическая цепь при последовательном соединении $R$ -, $L$ - и $C$ -элементов.....	113
2.8. Электрическая цепь при параллельном соединении $R$ -, $L$ - и $C$ -элементов.....	118
2.9. Особенности расчета цепей синусоидального тока.....	122
2.10. Измерения в цепях однофазного переменного тока.....	123
2.11. Упражнения по теме «Однофазные цепи синусоидального тока».....	128
2.12. Домашнее задание № 2 «Расчет электрических параметров индукционной тигельной плавильной печи».....	167
<b>3. Трехфазные цепи синусоидального тока .....</b>	<b>168</b>
3.1. Особенности применения энергии трехфазного переменного тока.....	168
3.2. Соединение обмоток источника и фаз приемника звездой..	176
3.3. Соединение обмоток источника и фаз приемника треугольником.....	181
3.4. Трехфазная цепь с несимметричным приемником.....	184
3.5. Мощность в трехфазной системе. Пример расчета параметров трехфазной конвейерной печи сопротивления.....	193

3.6. Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях металлургических установок.....	202
3.7. Измерения в цепях трехфазного переменного тока .....	207
3.8. Упражнения по теме «Трехфазные цепи синусоидального тока» .....	208
3.9. Домашнее задание № 3 «Расчет электрических параметров трехфазной дуговой сталеплавильной печи» .....	233
<b>4. Применение электромагнитных устройств в металлургии ...</b>	<b>235</b>
4.1. Магнитные цепи .....	235
4.2. Трансформатор .....	246
4.3. Электромагнитные устройства, использующие энергию вращающегося поля .....	272
4.4. Электромагнитные устройства, использующие энергию бегущего поля .....	290
4.5. Электрические машины постоянного тока в приводе механизмов металлургических установок .....	296
4.6. Упражнение по теме: «Электромагнитные устройства» .....	309
4.7. Домашнее задание №4 «Расчет электрических параметров однофазного трансформатора».....	316
<b>Библиографический список .....</b>	<b>317</b>
<b>Приложение. Примеры расчетов параметров электромагнитных устройств .....</b>	<b>319</b>
1. Расчет параметров трехфазного трансформатора, работающего на мостовой выпрямитель с дуговой нагрузкой ...	319
2. Расчет параметров электромагнитного кристаллизатора для разливки алюминиевых сплавов .....	327
3. Расчет параметров индукционной канальной печи для плавки медных сплавов с моделированием в пакете SIMULINK программы MatLab.....	334
4. Расчет параметров магнитодинамического насоса для транспортировки и разливки жидкого металла .....	346
5. Расчет параметров установки для высокочастотного индукционного нагрева стальных деталей под термообработку .....	355
6. Расчет параметров установки с высокочастотным индукционным плазмотроном для получения электроплавленных сфероидизированных материалов .....	359
7. Расчет параметров индукционной тигельной печи для выплавки синтетического чугуна с моделированием в пакете SIMULINK программы MatLab.....	363
8. Расчет параметров индукционной печи с «холодным» тиглем для выплавки жаропрочных сплавов .....	377

9. Расчет параметров асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	385
10. Расчет параметров установки с вращающимся полем для очистки стружки от масла.....	391
11. Расчет параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок с моделированием в пакете SIMULINK программы MatLab.....	396
12. Расчет параметров кольцевого статора для перемешивания жидкого чугуна в ковше.....	405
13. Расчет параметров плоского статора для перемешивания жидкой стали в ковше .....	411
14. Расчет параметров электромагнитного лотка для транспортирования и разливки жидкого алюминия.....	417

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника является наукой о техническом использовании электромагнитных явлений, а также отраслью техники, связанной с применением их для преобразования энергии природы в электрическую (электроэнергетика). Значение электротехники определяется возможностью получения значительных количеств электрической энергии, сравнительной простотой ее передачи на расстояние и легкостью преобразования в энергию других видов – тепловую, механическую, световую, химическую и т. д. На базе широкого применения электрической энергии развиваются наиболее энергоемкие производства (электрометаллургия стали, ферросплавов и цветных металлов, электротермия, электрохимия). В результате перехода на электротехнологические процессы повышается качество металлов и материалов, появляется возможность создавать материалы, которые иным способом получить невозможно, а также улучшаются санитарные условия труда (социальный фактор) и снижается вредное воздействие на окружающую среду (экологический фактор).

В металлургии широко применяется электронагрев, который в отличие от газового значительно меньше влияет на «загрязненность» металла, способствует рафинированию и повышению свойств сталей и сплавов при прохождении через них электрического тока, применении электрического разряда, вихревых токов, электромагнитного поля. Многообразие электротехнических явлений делает возможной комплексную обработку расплава в вакууме при регулируемом массообмене, реализацию различных технологических операций в одном агрегате, механизацию и автоматизацию производства. Это позволяет интенсифицировать существующие процессы, создавать новые способы выплавки и рафинирования черных и цветных металлов, решать в условиях истощения природных ресурсов актуальные задачи повышения качества продукции, снижения ее себестоимости, улучшения санитарно-гигиенических условий труда.

Преобразование электрической энергии в тепловую (теплогенерация) в электротехнологических установках происходит в результате необратимого рассеяния (диссипации) энергии электромагнитного поля в нагреваемом материале по закону Джоуля–Ленца, при магнитной поляризации ферромагнитного материала, электрической поляризации диэлектрика, преобразовании энергии потока ускоренных в электрическом поле электронов, возникновении электрического разряда в газе или при воздействии когерент-

ного излучения квантового генератора, возбуждаемого электромагнитным полем.

Вращающиеся и бегущие магнитные поля, которые переводят электрическую энергию в механическую или гидродинамическую с минимальными потерями на нагрев, используют для создания электродвигателей и устройств управления движением жидкого металла.

Подвод к печи и получение электроэнергии необходимых параметров осуществляют с помощью электротехнических коммутационных и преобразовательных устройств – высоковольтных и автоматических выключателей, контакторов, магнитных пускателей, трансформаторов, реакторов, выпрямителей, преобразователей частоты. Названная аппаратура совместно с печным преобразователем электроэнергии в тепловую (методами сопротивления, индукционным, дуговым) относится к силовой цепи установки и обтекает рабочим током, составляющим, как правило, тысячи ампер. Привод механизмов печи (наклона, перемещения электрода и др.) осуществляется с помощью электрических двигателей (асинхронных, постоянного тока).

Для изменения режимов работы этих устройств применяют цепи управления, как правило, слаботочные, которые вместе с измерительной аппаратурой (амперметр, вольтметр, фазометр и др.) размещают на специальном пульте. В этих цепях широко применяют элементы электроники (диод, тиристор, транзистор, интегральная микросхема, контроллер) и преобразователи, выполненные с их использованием, работа которых определяется законами электротехники. Совокупность элементов электроники и электротехнических устройств определяют понятием «электрооборудование металлургической установки».

Инженер-металлург (технолог цеха) разрабатывает технологию выплавки сплава, а значит, должен задать характер изменения тепловых потоков в рабочем пространстве печи; оценить по ним вводимую в печь электрическую мощность, силу тока, напряжение; выбрать в зависимости от металлургических возможностей род тока, принцип действия и тип преобразователя (источника питания); определить диапазон изменения электрических величин во времени; составить программу плавки, т.е. работы всего электрооборудования.

Автору довелось разрабатывать и создавать промышленные электротермические установки для металлургических и литейных цехов – дуговые и струйные плазмотроны постоянного тока, дуговые и плазменные плавильные печи, установки комбинированного нагрева, высокочастотные индукционно-плазменные, электромагнитного перемешивания металла, электромагнитные аппараты вихревого слоя, а

также системы управления к ним. На своем опыте он убедился, как важно знать и уметь применять на практике законы и явления электротехники будущим технологам.

В течение многих лет автор преподает в МИСиС курсы по методике, в основу которой положено профилирование, позволяющее рассматривать законы и явления электротехники, работу электротехнического оборудования на примерах металлургических установок.

Перечисленные выше вопросы отражены в известном учебнике [1]. Однако с момента его издания произошли изменения, основная особенность которых – подготовка бакалавров и магистров по металлургическому направлению. В новых учебных планах предусмотрены курсы по электротехнике, электронике, микропроцессорам, электрооборудованию. Кроме того, в силовой электронике появились в промышленном исполнении биполярные транзисторы с изолированным затвором и устройства, выполненные на них. В связи с этим возникла необходимость переработки учебника с добавлением раздела по микропроцессорам, расширением вопросов электрооборудования установок, введением примеров устройств управления с использованием контроллеров, а также примеров расчетов электрических параметров силовых цепей электроустановок, что целесообразно для выполнения КНИР, выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров, дипломных проектов специалистов с привлечением современных методов моделирования.

Материал учебника направлен на формирование у металлургов знаний по техническим возможностям и принципу действия электрооборудования основных металлургических установок, методам расчета их электрических характеристик.



# 1. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 1.1. Особенности нагрева материалов энергией постоянного тока

При наложении электромагнитного поля в проводящей среде (например, в кристаллической решетке металлов) электроны проводимости, не ослабляя своего хаотического движения со скоростями порядка тысяч км/с, сравнительно медленно со скоростью  $v_d$  порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  м/с «сносятся» против вектора  $\vec{E}$  силой  $\vec{F}(H)$ :

$$\vec{F} = -|e|\vec{E} = m_{\text{эф}} \frac{v_d}{dt},$$

где  $e = 1,602 \cdot 10^{-16}$  Кл – заряд электрона;

$m_{\text{эф}}$  – эффективная масса электрона проводимости, отличающаяся от массы покоя электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг по причине электростатических взаимодействий в кристаллической решетке.

Такое слабое упорядоченное движение («дрейф») электронов обуславливает ток проводимости плотностью ( $\text{А/м}^2$ )

$$\vec{J} = -N_e e v_d,$$

где  $N_e$  – плотность электронов проводимости,  $\text{м}^{-3}$ .

В металлах положительные ионы закреплены в узлах кристаллической решетки, совершая хаотические гармонические колебания относительно своих положений равновесия с амплитудой смещения  $\Delta x$  при данной температуре  $T$ . Колебания ионов нарушают периодичность кристаллической решетки, препятствуют упорядоченному движению электронов, вызывая электрическое сопротивление току проводимости согласно известному в электротехнике закону Ома.

Электроны рассеиваются внутри решетки, передавая ионам при неупругом взаимодействии избыток кинетической энергии  $\Delta K_e$  (Дж), приобретенной в электромагнитном поле напряженностью  $E$ :

$$\Delta K_e = 0,5 m_{\text{эф}} v_d^2.$$

При таком взаимодействии возрастает потенциальная энергия ионов  $\Delta G$  (Дж) массой  $M$  (кг) вследствие увеличения амплитуды  $\Delta x$  те-

пловых колебаний с максимальной (характеристической) угловой частотой  $\omega$  ( $\text{с}^{-1}$ )

$$\Delta G = 0,5 M \omega^2 (\Delta x)^2,$$

что определяет повышение температуры металла.

Если прохождение тока проводимости не связано с изменениями структуры вещества и не сопровождается химическими процессами, внешняя работа электрических сил в соответствии с теоремой Умова полностью идет на изменение тепловой энергии в единице объема нагреваемого тела со скоростью  $q_v$  ( $\text{Вт/м}^3$ ):

$$N_e = v_d F = \frac{JF}{e} = q_v.$$

Соотношение выражает закон теплового действия тока проводимости плотностью  $J$ , известный под названием закона Джоуля–Ленца и являющийся частным случаем закона сохранения энергии.

Необходимый для теплогенерации ток проводимости можно создать, например, вдоль оси нагреваемого электропроводного тела, если с помощью контактов присоединить тело к внешней электрической цепи, имеющей требуемую согласно закону Ома разность потенциалов. Такой контактный (кондукционный) подвод энергии осуществляют в электрических установках, которые могут работать на постоянном (или переменном) токе (рис. 1.1).

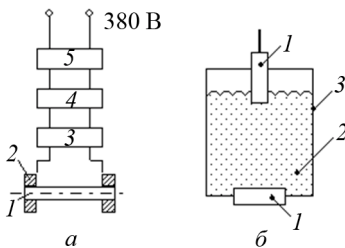


Рис. 1.1. Схемы установок прямого нагрева

В установках прямого нагрева (рис. 1.1, *a*) пропускают постоянный ток через нагрузку  $I$  с помощью контактов  $2$ , осуществляя изменение ее температуры для целей горячей обработки давлением (ковки, штамповки, отжига) и термической обработки (заковки, отпуска, гибки); сварки штабиков тугоплавких металлов; графитизации уголь-

ных изделий; получения карборунда. Изменение подводимой от сети мощности осуществляют тиристорами выпрямителя 3 и переключением обмоток трансформатора 4 (5 – автоматический выключатель). Применение постоянного тока (вместо переменного) позволяет равномерно прогревать нагрузку по всему сечению, а значит, снижать расход электроэнергии, время обработки, повышать качество продукции, изменять ее свойства. Количество тепла, выделяемого при прохождении тока, по закону Джоуля–Ленца равно (Дж):

$$Q = 4190 \cdot 0,86 I^2 R \tau,$$

где  $I$  – сила тока, А;

$R$  – активное сопротивление проводника, Ом;

$\tau$  – время прохождения тока, ч.

Мощность, потребляемая на нагрев (кВт),

$$P = I^2 R \cdot 10^{-3}.$$

Для прямого нагрева, как правило, требуются большие значения токов (сотни и тысячи ампер) при относительно низких напряжениях (5...25) В.

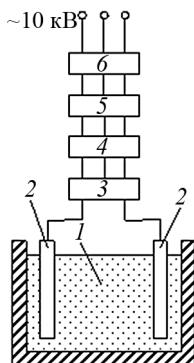


Рис. 1.2. Схема электролизера

Такой способ используют и для плавления оксидных материалов (варки стекла, базальта и др.), когда ток пропускают между электродами 1 через нагрузку 2 в рабочей камере 3 (рис 1.1, б). Структура электрооборудования аналогична рис. 1.1, а.

В промышленности применяют технологические процессы, в которых используют одновременно электронагрев сопротивлением и

химические воздействия, например электролиз (рис. 1.2). Сущность его состоит в выделении из электролита при протекании через него постоянного тока частиц вещества и осаждении их на погруженных в ванну электродах (электроэкстракция) или в переносе веществ с одного электрода 2 через электролит 1 на другой (электролитическое рафинирование). Так получают алюминий, цинк, магний, очищают медь, никель, свинец. В качестве источника питания применяют выпрямительные агрегаты 3 на тиристорах, трансформатор 4 с переключением ступеней напряжения, высоковольтный выключатель 5 и разъединитель 6. Установленная мощность серии ванн при производстве алюминия достигает 250 МВ·А; удельный расход электроэнергии 14...16 МВт·ч/т.

Если через нагрузку (рис. 1.3) от источника энергии в десятки киловольт пропускать постоянный ток в виде импульсов длительностью  $10^{-4}...10^{-5}$  с при плотности тока в импульсе  $10^6...10^7$  А/см<sup>2</sup>, то в ней можно получить пиковые мощности от десятков до тысяч мегаватт, что позволяет, например, нагревать газовую плазму до  $4 \cdot 10^4...5 \cdot 10^4$  К с последующей автозакалкой ее со скоростями  $10^7...10^8$  К/с. Это дает возможность проводить процессы модифицирования и получения порошков различных материалов путем обработки дисперсных и газовых сред; очищать поверхность отливок в воде; измельчать структуру кристаллизирующегося сплава.

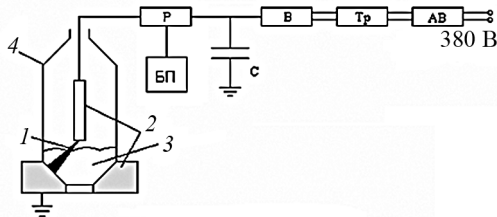


Рис. 1.3. Схема импульсной установки

Импульсный разряд 1 (см. рис 1.3) возникает между электродами 2 (или обрабатываемым металлом 3) в рабочем пространстве печи 4 или в жидкости.

В первом случае проводят восстановление металлов из оксидов с получением порошков элементов или соединений. Во втором случае обрабатывают поверхность отливок от пригара (электрогидроимпульсные установки). Импульс тока возникает при разряде конденсатора С (накопитель) через разрядник Р. Напряжение от сети устанавли-

ливается повышающим трансформатором Тр и преобразуется высоковольтным выпрямителем В (АВ – автоматический выключатель; БП – блок поджига).

Теплогенерация за счет электрической энергии в газообразной среде связана с целым рядом физических явлений и энергетических эффектов. В зависимости от величины внешнего энергетического воздействия электромагнитного поля возможно возбуждение нейтральных молекул газа с усилением колебательного движения атомов, диссоциация с расщеплением на более простые частицы, фрагментированные молекулы или атомы, ионизация. Наличие заряженных частиц создает электропроводность нагреваемой газовой среды, способствуя диссипации энергии электромагнитного поля и возникновению электрического разряда.

В металлургии применяют следующие типы электрических разрядов в газах:

- *коронный* – для ионизации аэрозолей в электрическом поле напряженностью 15 кВ/см и выше при очистке дымовых газов в электрофильтрах, а также в различных электронно-ионных технологических процессах;
- *искровой* – для электроэрозионной обработки металлов за счет теплового и механического воздействия импульсных электронных лавин, возникающих при напряжении 100...200 В и нагревающих газ до  $10^4$  К;
- *тлеющий* – для распыления металлов за счет бомбардировки катода положительными ионами разреженного газа при получении тонких пленок в полупроводниковой технологии и при производстве сверхпроводящих материалов;
- *дуговой* – для теплогенерации в дуговых печах, при дуговой сварке, в электрохимических горелках. Основные разновидности дугового разряда – электрическая дуга постоянного или переменного тока, горящая при атмосферном давлении или в вакууме, и импульсный разряд.

В электрофильтре (рис. 1.4), применяемом для очистки отходящих из печи дымовых газов от пыли, коронный разряд существует вокруг коронирующего электрода 6, на который подается «минус» от источника питания (регулирующий автотрансформатор 1 или тиристорный регулятор напряжения, повышающий трансформатор 2, высоковольтный выпрямитель 3, кабель с ограничительным сопротивлением 4, изолирующий вывод 5); «плюс» от источника питания подводят к осадительному электроду 7. При разности потенциалов между электродами  $U_0 = 50...80$  кВ и токе 0,1...0,5 мА/м

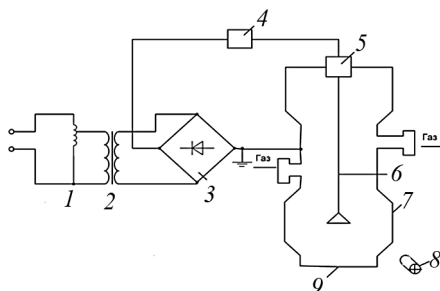


Рис. 1.4. Принципиальная схема электрофильтра

длины электрода пылинки газа получают отрицательный заряд и направляются к положительному осадительному электроду, оседая на нем. Он периодически встряхивается механизмом 8, а пыль осыпается в бункер 9.

Энергия дугового разряда постоянного тока используется в дуговых вакуумных печах, дуговых печах постоянного тока, в плазменно-дуговых печах, в установках печь-ковш, для подогрева жидкого металла в промежуточной емкости машин литья под давлением, в установках комбинированного нагрева (сопротивлением и дугового). Электрическая мощность дугового разряда  $P_d$ , характеризующая (при коэффициенте использования энергии данного способа теплогенерации, равном единице) тепловую мощность, равна

$$P_d = I_d U_d = I_d (U_k + \text{grad} U_c l_c + U_a) \approx I_d [(U_k + U_a) + \text{grad} U_c l_d], \quad (1.1)$$

где  $I_d$  – сила тока дугового разряда;

$l_c$  – длина столба дуги;

$l_d$  – общая длина дуги, которую вследствие малой протяженности катодной и анодной областей можно считать равной длине столба, т.е.  $l_d \approx l_c$ .

Уравнение (1.1) показывает возможность регулирования тепловой мощности дугового разряда в широких пределах изменением силы тока, напряжения дуги, длины дуги или межэлектродного расстояния при перемещениях электрода.

В вакуумной дуговой печи (ВДП) преобразование электрической энергии в тепловую происходит в дуговом разряде постоянного тока, который существует в вакууме или разреженных парах переплавляемого металла (рис. 1.5). Электрод (катод) 1, подаваемый сверху вниз двигателем постоянного тока М, расплавляется энергией дуги 2, го-

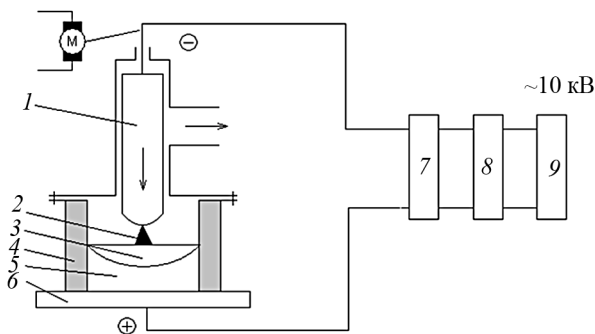


Рис. 1.5. Схема дуговой вакуумной печи

рящей между ним и металлической ванной (анодом) 3 в кристаллизаторе 4. Слиток 5 наплавляется снизу вверх от поддона 6. Разрежение в рабочем пространстве печи и отсутствие футеровки позволяют получать плотный высококачественный металл (стали, сплавы, титан, цирконий, ниобий, медь).

Электроэнергия постоянного тока поступает от тиристорного выпрямителя 7 и трансформатора 8 (9 – высоковольтный выключатель). Максимальная масса слитка 56 т, напряжение – до 150 В, мощность источника питания 3 МВт. Удельный расход электроэнергии 1,2...1,7 МВт·ч/т.

Применение для выплавки и обработки сталей, сплавов и цветных металлов дуги постоянного тока (в отличие от дуги переменного тока) позволяет за счет герметичности печи улучшить санитарно-гигиенические условия труда, снизить колебания параметров электрического режима, шум, угар элементов, расход электродов, повысить стойкость футеровки и качество получаемого продукта. В плавильных печах (рис. 1.6) вместимостью до 180 т дуга постоянного тока 1 горит между полым графитированным наконечником 2 электрода (катода) 3 и ванной 4 (6 – свод печи, 7 – подина).

Электроэнергия подается к ванне через подовый электрод (анод) 5 от тиристорного выпрямителя ТВ мощностью до 90 МВт, печного трансформатора Тр, выключателя ВВ и разъединителя Р (Др<sub>1</sub> – реактор). Удельный расход электроэнергии – до 600 кВт·ч/т.

В руднотермической рудовосстановительной (твердым углеродом) печи постоянного тока (рис. 1.7) между электродом-катодом 1, перемещающимся двигателем М, и расплавом 2 горит электрическая дуга 3 внутри тигля, закрытого шихтой 6. Энергия выделяется в дуге и мето-

дом сопротивления через шихту, находящуюся в тигле 7 с зонтом 8. Образующиеся газы выходят из печи через отверстие 9, а жидкий расплав периодически – через летку 10. Токопровод к расплаву осуществляют с помощью подового электрода-анода 4. Структура источника питания 5 аналогична структуре электрооборудования по рис. 1.6. В отличие от печи переменного тока этот способ позволяет значительно снизить реактивную мощность, удельный расход электроэнергии, расход электродов, повысить качество продукции и значение коэффициента мощности; снизить уровень напряжения холостого хода (70 В) источника питания, отказаться от использования реактора.

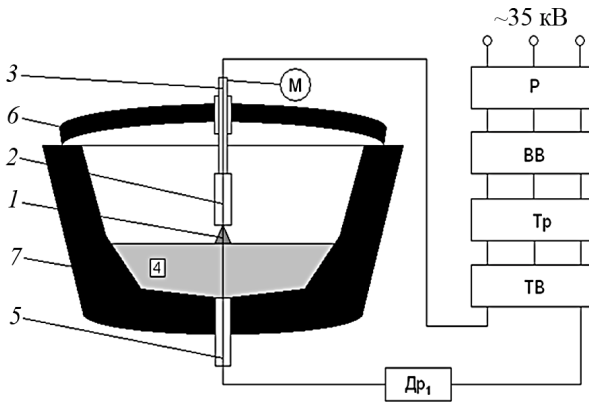


Рис. 1.6. Схема печи с дугой постоянного тока

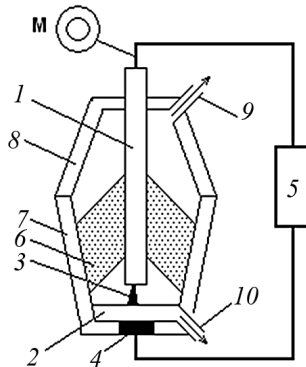


Рис. 1.7. Схема руднотермической печи постоянного тока



Внепечную обработку жидкой стали проводят в установках печь-ковш (рис. 1.8) вместимостью до 400 т. Жидкий металл *1* подогревают в ковше *2* энергией, выделяющейся в электрической дуге *4*, между графитированным электродом *5* и расплавом *1*. Электрод перемещается двигателем *М* через крышку *6*. Подвод постоянного тока осуществляют от источника питания *3*, структура которого аналогична структуре электрооборудования по рис. 1.6. Перемешивание металла производят электромагнитным статором *7*, к обмоткам которого электроэнергия частотой 1 Гц и напряжением 320 В подается от тиристорного преобразователя частоты *8*. Подовый электрод *9* выполнен в виде металлокерамического блока.

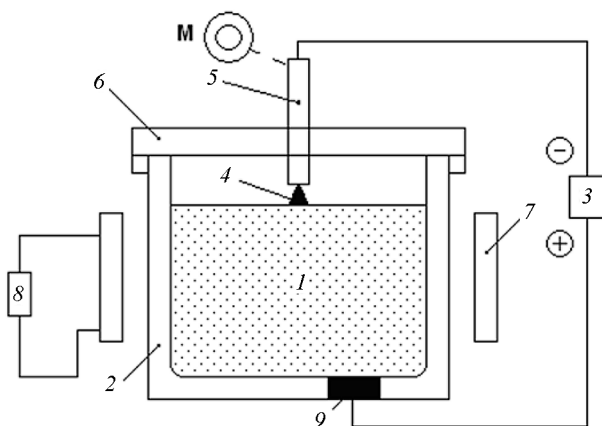


Рис. 1.8. Схема установки печь-ковш

С применением в установках печь-ковш вместо трех дуг переменного тока одной дуги постоянного тока появляется возможность воздействовать на реакции между шлаком и металлом, протекающие в электрохимическом режиме, с целью ускорения рафинирования жидкого металла при меньшем расходе реагентов, сократить длительность цикла рафинирования, снизить расход огнеупоров и значительно улучшить технологические и эксплуатационные характеристики стали. Мощность источника дугового нагрева достигает 40 МВт, а статора – 1 МВ · А.

В ряде случаев, например при переплаве лома алюминиевых сплавов, наиболее эффективным способом является применение комбинированного нагрева – сопротивлением и дугового (рис 1.9). В этом случае футеровка тигля *1* нагревается энергией, выделяющейся при

прохождении переменного тока по нагревателям 2, которые получают напряжение из сети (380 В) через тиристорный регулятор напряжения 3. Нагретая футеровка отдает энергию металлическому лому 4. Для ускорения расплавления лома и улучшения металлургических показателей процесса вводят дополнительный нагрев шихты энергией дуги 5 постоянного тока, горящей между перемещающимся двигателем М, электродом 6 и металлом 4 под крышкой 7. Напряжение на дугу подают от источника питания 8 к сводовому 6 и подовому 9 электродам; структура источника аналогична электрооборудованию по рис. 1.6.

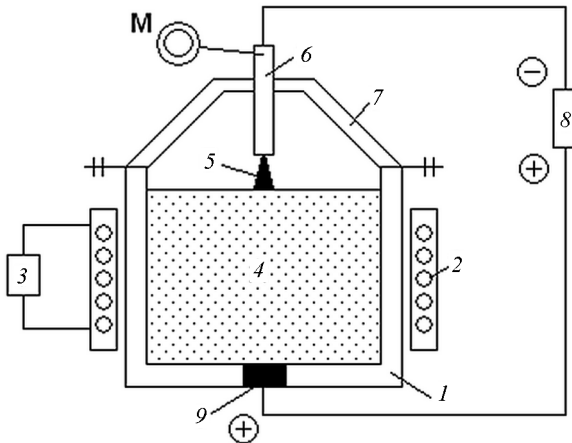


Рис. 1.9. Схема установки комбинированного нагрева

При достаточно высокой степени ионизации газ дугового разряда приобретает особые электрофизические и физико-химические свойства, что дает основание рассматривать его как четвертое агрегатное состояние вещества – плазму.

Газоразрядную плазму, получаемую при электрических разрядах в газах, применяют как энергоноситель для косвенного подвода тепловой энергии в зону технологических процессов плазменных печей и как активный технологический фактор при плазмохимической технологии, когда пирометаллургические процессы протекают в среде диссоциированных и ионизированных газов.

Высокое энергосодержание плазмы позволяет использовать ее для плавки металлов, высоколегированных сталей, сплавов, ферросплавов, порошков, прямого восстановления металлов из руд. Ее получа-

ют в дуговых плазмотронах прямого (анод вынесен на ванну) и косвенного (струйного) действия.

Установка плазмотрона 3 прямого действия (рис. 1.10) вместо графитированного электрода на печи постоянного тока исключает загрязнение металла углеродом электрода и позволяет легировать, раскислять (окислять) его различными газовыми средами. В плазменной дуговой печи (ПДП) стабилизированная газом 2 дуга постоянного тока 1 горит между катодом плазмотрона 10 и ванной металла 9. Ток подводят от источника 4 к катоду плазмотрона и подовому электроду – аноду 5. Металл находится на подине печи 8 под сводом 6, между которыми установлено вакуумное уплотнение 7. Такие печи наиболее эффективны при переплаве высоколегированных отходов; выплавке высокопрочного чугуна; сплавов алюминия, меди, ванадия; коррозионностойких сталей с низким содержанием углерода. Структура электрооборудования аналогична структуре печи постоянного тока (см. рис. 1.6), однако вводят дополнительный выпрямитель для зажигания вспомогательной дуги, горячей между катодом 10 и соплом 11 плазмотрона.

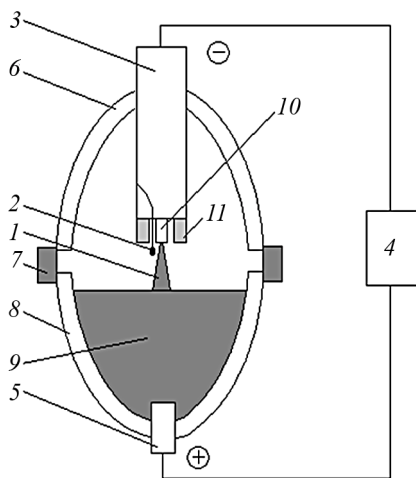


Рис. 1.10. Схема плазменно-дуговой печи

Плазмтроны косвенного действия используют при обработке неэлектропроводных материалов, нанесении покрытий, резке, сварке, прямом восстановлении металлов из руд в шахтных печах (рис. 1.11), интенсификации процессов существующих плавильных восстанови-

тельных агрегатов (в доменной печи, вагранке, с жидкой ванной, ферросплавных печах, при агломерации, в электролизерах).

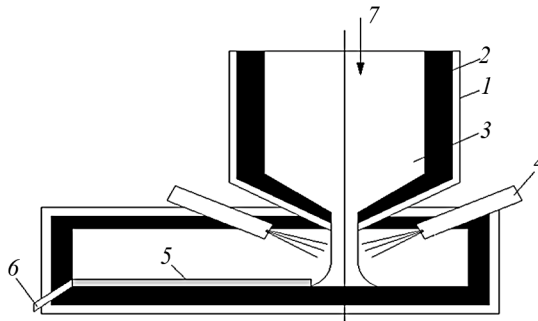


Рис. 1.11. Схема восстановительной плазменной шахтной печи:  
1 – кожух шахты; 2 – футеровка; 3 – шихта; 4 – плазмотроны;  
5 – жидкий расплав; 6 – летка; 7 – загрузка шихты

В установках электронного нагрева теплогенерация происходит при взаимодействии потока электронов, ускоренных в электрическом поле напряжением 15...40 кВ, на поверхности нагреваемого металла. Внедряясь на глубину на несколько микрометров, электроны усиливают амплитуду тепловых колебаний ионов в узлах решетки, вызывая местное (локальное) повышение температуры материала. В электронно-лучевой установке 1 (рис. 1.12) электронный луч 2 формируют в излучателе – электронной пушке 3, имеющей два катода. Основной катод К выполнен в виде массивной вогнутой снизу вольфрамовой пластины и разогревается до 2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода К<sub>1</sub>, который выполнен в виде нагреваемой током вольфрамовой спирали. Между катодами приложено напряжение 3...5 кВ постоянного тока. Анод А имеет специальную форму для создания в пространстве между ним и катодом такого электрического поля, которое сфокусировало бы электронный пучок так, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода. Пройдя через анод, луч попадает в лучепровод Л, соединяющий катодную камеру с плавильной камерой установки, в которой находится переплавляемая заготовка Э. Часть электронов луча попадает на поверхность ванны слитка С, формирующегося в кристаллизаторе 4.

В лучепроводе производится дополнительная магнитная фокусировка с помощью магнитных линз М. Максимальное давление газа в рабочей камере 10...40 МПа (0,1...0,3 мм рт. ст.). В ней выплавляют

стали и сплавы на основе железа, кобальта, никеля с низким содержанием углерода; тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден), реакционные металлы (титан, цирконий). Источник питания – высоковольтный выпрямитель 5 (6 – автоматический выключатель). Мощность одной электронной пушки достигает 7,5 МВт. Удельный расход электроэнергии 0,7...1,0 МВт · ч/т.

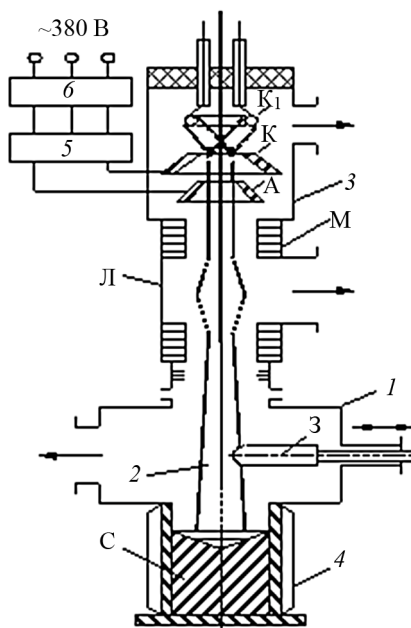


Рис. 1.12. Схема электронно-лучевой установки

## 1.2. Элементы и режимы работы электрических цепей

Энергетические процессы, происходящие в электротехнических устройствах, рассмотренных выше, как правило, сложны. Однако во многих случаях основные характеристики электротехнических устройств могут быть получены и описаны с помощью интегральных понятий (скалярных величин) — электродвижущей силы (э.д.с.)  $E$ , тока  $I$ , напряжения  $U$ .

При таком описании совокупность электротехнических устройств, составляющих путь электрического тока, рассматривают как электриче-

скую цепь. Отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи, выполняющее в ней определенную функцию, называют *элементом цепи*. Электрическая цепь предназначена для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Элементы цепи, генерирующие электрическую энергию, называют источниками (активными), а элементы, использующие электрическую энергию, – приемниками (активными или пассивными). Источники преобразуют в электрическую иные виды энергии: механическую – в машинных генераторах, химическую – в гальванических элементах и аккумуляторах, тепловую – в термоэлементах, лучистую – в фотоэлементах и др.

Приемники, наоборот, преобразуют электрическую в иные виды энергии: механическую – в электродвигателях, химическую – в аккумуляторах, тепловую – в электрохимических установках и др.

К элементам, предназначенным для передачи электроэнергии от источника к приемнику, относят провода и устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения; их называют *преобразователями* – *трансформаторы, выпрямители, преобразователи частоты*. В металлургических установках преобразователи будем условно называть *источниками питания*.

Например, в ДВП (рис. 1.13) источником питания служит выпрямительный агрегат *1*, состоящий из трансформатора и выпрямителя на тиристорах, а приемником является дуговой разряд постоянного тока *2* (электрическая дуга). Подвод тока от источника питания к дуге осуществляется специальными соединительными проводами *3* – медными (или алюминиевыми) шинами (вторичный токоподвод).

Такое изображение элементов, при котором указаны их основные функции, называют *функциональной схемой*.

Основными характеристиками элементов электрических цепей являются зависимости их напряжения от тока, называемые *вольтамперными характеристиками (ВАХ)*.

Процессы, протекающие в электрических цепях металлургических установок, исследуют экспериментально или математически. Во втором случае элементы цепи заменяют условными обозначениями и называют схемой соединения цепи, или принципиальной схемой. Она позволяет реализовать логику работы элементов и их взаимосвязь. Например, схема цепи дуговой вакуумной печи (рис. 1.14) включает источник питания *3*, токоподвод *1*, электрическую дугу *2*, контрольно-измерительную аппаратуру – амперметр *4* и вольтметр *5*.

Цепь называют *силовой*, если через ее элементы протекает рабочий ток установки и изображают более толстой линией.

Слаботочные цепи (например, подключение вольтметра  $V$ ) относят к *цепям контроля и управления*.

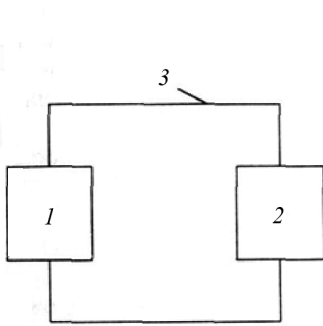


Рис. 1.13. Цепь электропитания ДВП

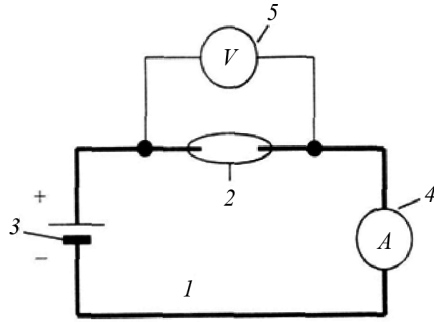


Рис. 1.14. Схема соединения цепи ДВП

Для расчета параметров и режимов работы схемы соединения ее элементов аппроксимируют эквивалентной *схемой замещения*. Значения токов, напряжений и мощностей в ее участках с достаточным приближением соответствуют реальным величинам. Схемы замещения иногда называют *математическими моделями*, поскольку они соответствуют математическому описанию реальных электрических цепей. Одной и той же электрической цепи может соответствовать несколько различных схем замещения.

Например, для цепи, показанной на рис. 1.14, схема замещения приведена на рис. 1.15. Здесь источник питания  $\mathcal{E}$  аппроксимирован источником э.д.с.  $E$  с внутренним сопротивлением  $R_{вн}$ ; электрическая дуга – резистивным элементом с сопротивлением  $R_{д}$ ; вольтметр – резистивным элементом с сопротивлением  $R_V$ ; амперметр – резистивным элементом с сопротивлением  $R_A$ .

Соединение участков цепи, т.е. топология схемы, определяется понятиями: *ветвь*, *узел*, *контур*. Участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же по величине ток ( $I_1, I_2, I_3$ ), называют *ветвью*. Он состоит из одного или нескольких последовательно соединенных элементов, каждый из которых имеет два вывода (начало и конец), причем к концу каждого предыдущего элемента присоединяют начало следующего; на рис. 1.15 число ветвей  $p = 3$ .

В *узле* схемы соединены три и более ветвей. Его изображают точкой, обозначают буквой, например,  $q_1$  или  $q_2$  (см. рис. 1.15). Разли-

чают понятия топологического и потенциального узлов. Топологические узлы, имеющие одинаковые потенциалы, могут быть объединены в один потенциальный узел.

*Контур* – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречаются более одного раза.

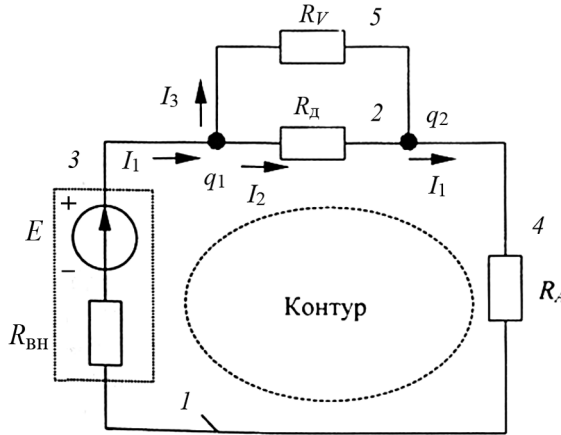


Рис. 1.15. Схема замещения цепи ДВП

Для однозначности описания процессов в электрических цепях необходимо задать условно положительные направления э.д.с. источников питания, тока в элементе или ветвях цепи, напряжения на зажимах цепи и между узлами. Внутри источника э.д.с. постоянного тока положительным является направление э.д.с. от отрицательного полюса к положительному, т.е. от полюса с низшим потенциалом к полюсу с высшим потенциалом.

По отношению к источнику э.д.с. все элементы, входящие в состав цепи, составляют внешний участок цепи. За положительное направление тока в цепи принимают направление, совпадающее с направлением э.д.с. Это значит, что во внешней цепи положительным является направление от положительного полюса источника э.д.с. к отрицательному.

За условное положительное направление напряжения на элементе цепи или между двумя узлами принимают направление, совпадающее с условным положительным направлением тока в элементе или ветви.

Условные положительные направления тока, э.д.с. и напряжения показывают на схемах стрелками. Действительные направления электрических величин, определяемых расчетом, могут совпадать



или не совпадать с условными. Если расчетом определено, что электрические величины положительны, то их действительные направления совпадают с условно принятыми положительными направлениями, и наоборот.

Электрические режимы работы металлургических установок и отдельных их элементов характеризуются определенными значениями тока, напряжения, мощности  $P$  и коэффициента полезного действия (к.п.д.)  $\eta_{эл}$ . Поскольку они в общем случае могут принимать достаточное множество значений, то и режимов может быть множество. Рассмотрим наиболее характерные для практики режимы работы цепи, состоящей из источника э.д.с. и приемника, – режимы холостого хода (х.х), короткого замыкания (к.з) и нагрузки.

В режиме *холостого хода* нагрузка  $R$  отключена от источника (рис. 1.16, зажимы  $a$  и  $b$  разомкнуты) и ток в цепи равен нулю. При холостом ходе напряжение на зажимах источника питания  $U = U_{x.x} = E$ . При  $R = \infty$  ток в цепи согласно закону Ома:

$$I = \frac{E}{R + R_{вн}} = 0.$$

Мощность в нагрузке (Вт) не выделяется:

$$P = IU_{x.x} = 0,$$

и работа не производится. В ДВП, например, режим холостого хода наступает при обрыве дуги, что приводит, как правило, к браку слитка металла.

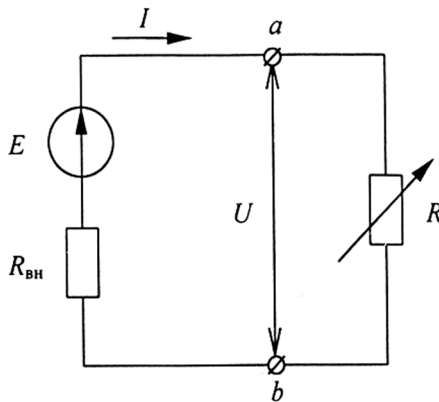


Рис. 1.16. Схема цепи постоянного тока с переменным сопротивлением

Электрический к.п.д ( $\eta_{эл}$ ), характеризующий эффективность передачи мощности от источника к приемнику, определяют по формуле

$$\eta_{эл} = \frac{P}{P_{и}} = \frac{P_{и} - P_{п}}{P_{и}} = \left(1 - \frac{P_{п}}{P_{и}}\right) \rightarrow 1,$$

где  $P_{и}$  – мощность источника,  $P_{и} = P + P_{п}$ ;

$P_{п}$  – мощность потерь в источнике, обусловленная сопротивлением  $R_{вн}$ :  $P_{п} = R_{вн} I^2$ .

В режиме *короткого замыкания* сопротивление нагрузки  $R$  равно нулю (зажимы  $a, b$  замкнуты накоротко), т.е. напряжение на зажимах источника  $U = U_{к.з} = 0$ . Ток короткого замыкания  $I_{к.з}$  ограничивается только внутренним сопротивлением источника питания и достигает больших значений:

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_{вн}}.$$

Мощность, выделяющаяся в приемнике, и электрический к.п.д равны нулю. Режим, как правило, является аварийным, однако при работе ДВП с него начинают процесс плавки – считают его эксплуатационным.

В режиме нагрузки ток, протекающий через приемник, производит работу. Пусть на рис. 1.16  $E$  и  $R_{вн} = \text{const}$ , а  $R$  – регулируемое сопротивление, от величины которого будет зависеть падение напряжения на нем. В этом случае

$$I = \frac{E}{R + R_{вн}};$$

$$E = IR + IR_{вн}.$$

где  $U = IR$  – падение напряжения на зажимах приемника;

$IR_{вн}$  – падение напряжения внутри источника;

$$U = E - IR_{вн}.$$

Зависимость является внешней характеристикой реального источника э.д.с. При условии, что  $E$  и  $R_{вн} = \text{const}$ , зависимость (рис 1.17) линейна. В режиме нагрузки следует выделить:

а) *номинальный режим (H)* получаем, когда источник э.д.с. работает при значениях тока, напряжения и мощности, указанных в пас-

порте данного технического устройства, длительное время. Однако следует отметить, что этот режим не всегда является рациональным для обеспечения заданной технологии;

б) *согласованный режим (С)* источника э.д.с. и потребителя имеет место, когда их сопротивления равны:  $R = R_{вн}$ , а ток  $I_C = 0,5I_{к.з}$ . Мощность приемника максимальна. Режим применяют в цепях с малыми токами – схемы автоматики, электрических измерений, где к.п.д. равно 0,5.

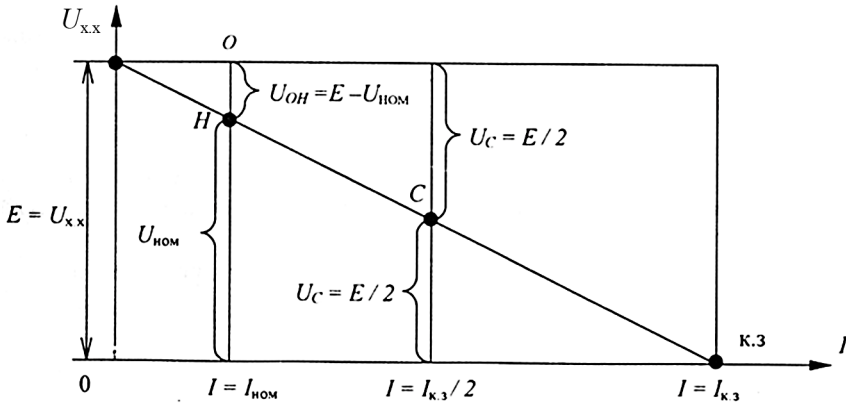


Рис 1.17. Внешняя характеристика реального источника э.д.с.

Для большинства промышленных источников питания электрометаллургических установок при номинальном режиме  $\eta_{эл} = 0,8...0,9$ . В этом случае номинальный ток во много раз меньше тока короткого замыкания.

В металлургической практике при исследовании электрических режимов работы электротехнических устройств рассматривают электрические цепи, содержащие несколько активных и пассивных элементов со смешанным соединением. Такие цепи называют *сложными разветвленными*. На рис. 1.18, а приведена упрощенная схема силовой цепи одноплазмотронной печи, представляющая собой разветвленную электрическую цепь с одним активным элементом (источником питания) и смешанным соединением пассивных элементов, а на рис. 1.18, б – ее схема замещения ( $R_k, R_b, R_{п}, R_{с}, R_{д1}, R_{д2}$  – сопротивления катода, ванны, подового электрода, балластного реостата, электрических дуг).

В случае, когда интересует режим работы только одной ветви схемы замещения, например с источником и катодом, ее выделяют (от

зажимов  $a, b$ ) относительно остальной части электрической цепи, заменяя последнюю двухполюсником (пунктир). Двухполюсником называют часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами – полюсами ( $a, b$ ). Двухполюсники, содержащие активные элементы, называют *активными* и обозначают прямоугольником с буквой А. Двухполюсники, которые не содержат активных элементов или в которых не возникает э.д.с, называют *пассивными* и обозначают прямоугольником с буквой П. Обычно источники в электротехнике рассматривают как простейшие активные двухполюсники, работающие в режиме источника э.д.с. или источника тока. Режим идеального источника э.д.с. характеризуется параметрами:  $E = \text{const}, R_{\text{вн}} = 0$  (рис. 1.19).

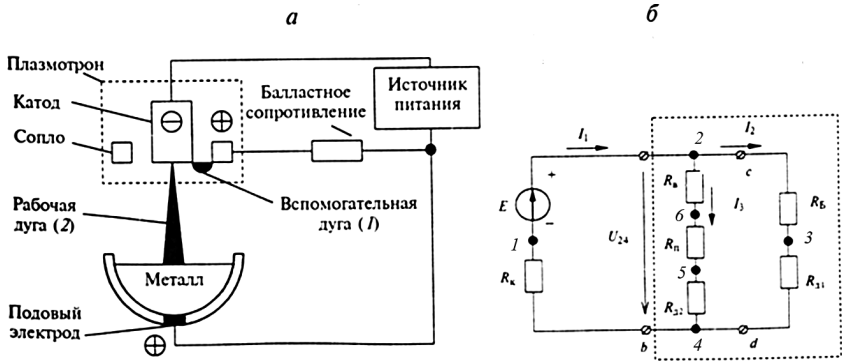


Рис. 1.18. Электрическая цепь (а) и схема замещения (б) одноплазменной печи

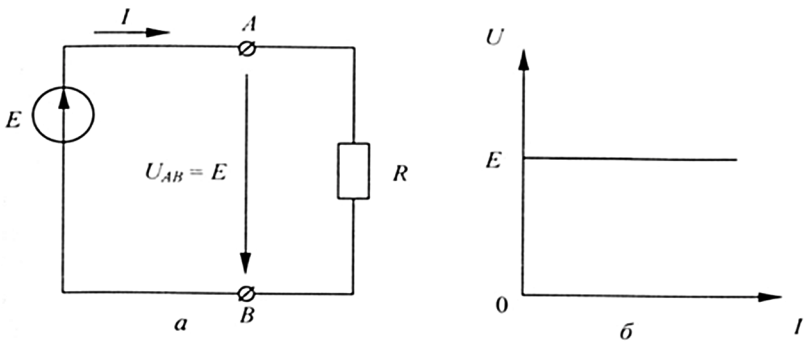


Рис. 1.19. Схема замещения (а) и внешняя ВАХ (б) идеального источника э.д.с.

Напряжение на зажимах источника э.д.с. не зависит от тока нагрузки и равно э.д.с.:  $U_{AB} = E$ .

Идеальный источник тока характеризуется неизменным значением тока:  $J = I_{к.з}$  и бесконечно большим внутренним сопротивлением (рис. 1.20).

Реальный источник э.д.с. состоит из последовательно соединенных идеального источника э.д.с. и резистивного элемента, сопротивление которого равно  $R_{вн}$  (рис. 1.21, а). Уравнение электрической цепи (рис. 1.21, б):

$$E = U_{AB} + IR_{вн}.$$

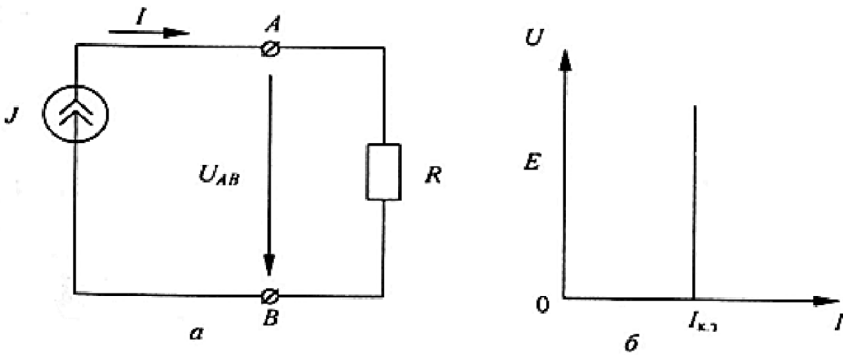


Рис. 1.20. Схема замещения (а) и внешняя ВАХ (б) идеального источника тока

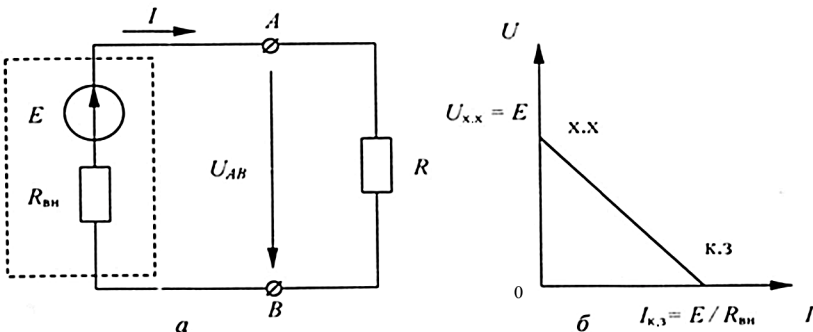


Рис. 1.21. Схема замещения (а) и внешняя ВАХ (б) реального источника э.д.с.

Для анализа работы цепей питания двигателей постоянного тока, дуговых печей на постоянном токе (ДВП, ПДП) возможно использо-

вание источников э.д.с. Например, внешняя ВАХ генератора постоянного тока и генератора постоянного напряжения (ГПН) с обмоткой независимого возбуждения для питания ДВП имеет вид, приведенный на рис. 1.22 (кривая 1).

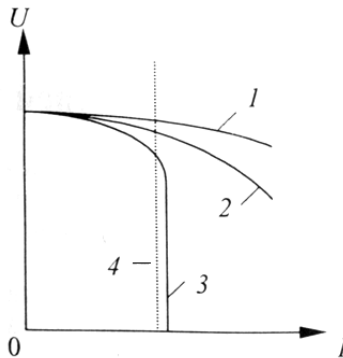


Рис. 1.22. Вольтамперные характеристики источников питания металлургических установок

Однако в ДВП целесообразнее применять источники тока, что обусловлено необходимостью стабилизации тока дуги с точностью до 1 % для обеспечения качества металла, повышения устойчивости горения дуги, а также для защиты (токоограничения) управляемых и неуправляемых клапанов полупроводниковых выпрямителей при изменениях нагрузки, возникающих в процессе работы печей.

Оптимальной внешней характеристикой источника питания в этом случае является крутопадающая в зоне рабочих режимов, приближающаяся к характеристике источника тока. Такие характеристики достигаются:

а) переводом источников э.д.с. (машинного генератора, трансформатора с выпрямителем) в режим источника тока за счет использования управляемых клапанов в комплекте со специальными системами управления с обратными связями по току и напряжению печи (см. рис. 1.22, кривые 2, 3);

б) с помощью так называемых параметрических источников тока, представляющих собой индуктивно-емкостные резонансные схемы (см. рис. 1.22, кривая 4). В этом случае имеем параллельно соединенные идеальный источник тока и резистивный элемент с сопротивлением источника  $R_{\text{вн}}$  (рис. 1.23). Уравнение электрической цепи:

$$I_{\text{к}} = I + I' = I + U_{\text{AB}} / R_{\text{вн}}.$$

Когда необходимо определить электрическое состояние двух ветвей разветвленной цепи, их выделяют относительно остальной схемы, которую заменяют четырехполюсником (см. рис 1.18, б, ветвь 2–4). Он имеет две пары зажимов: входные (*a*, *b*) и выходные (*c*, *d*); изображается прямоугольником и так же, как двухполюсник может быть пассивным или активным.

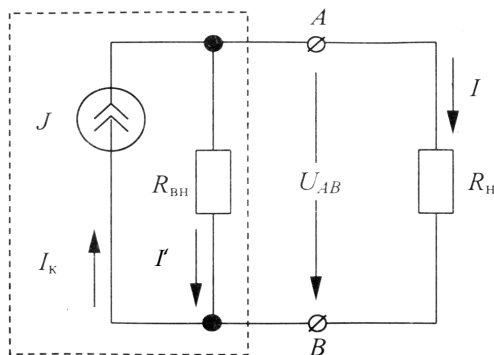


Рис. 1.23. Схема замещения реального источника тока

### 1.3. Методы расчета линейных электрических цепей

В инженерной практике возникает необходимость оценки электрических режимов металлургических установок, выбора источника питания, определения электрических потерь, к.п.д. установок, расчета токов и напряжений электрических дуг и т. д. Решение поставленных задач зависит от знания методов расчета линейных цепей постоянного тока и умения применить эти знания на практике. Условно силовые цепи металлургических установок можно разделить на цепи с одним источником электрической энергии и сложные цепи постоянного тока с несколькими источниками. Примером цепи с одним активным элементом – источником питания – может служить упрощенная схема одноплазмотронной печи (см. рис. 1.18, б).

Для анализа и расчета электрических цепей, как правило, используют метод непосредственного применения законов Кирхгофа (МНПЗК) и метод эквивалентных преобразований (МЭП).

Основой МНПЗК являются закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа. Преимущество метода заключается в том, что уравнения

могут быть составлены легко и быстро с использованием ЭВМ для анализа.

Закон Ома применяют для ветви или одноконтурной замкнутой цепи. Для ветви 2–6–5–4 (см. рис. 1.18, в), состоящей только из резисторов:

$$I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_{\text{вн}} + R_{\text{п}} + R_2} = \frac{U_{24}}{R_{\text{экв1}}}.$$

Для ветви 2–3–4, состоящей из  $R_6$  и  $R_{\text{д1}}$ :

$$I_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_6 + R_{\text{д1}}} = \frac{U_{24}}{R_{\text{экв2}}},$$

где  $\varphi_2, \varphi_4$  – потенциалы точек 2 и 4;

$U_{24}$ , – разность потенциалов или напряжение между точками 2 и 4;

$R_{\text{экв1}}, R_{\text{экв2}}$  – эквивалентные сопротивления.

Для ветви, содержащей источник э.д.с. и резистор:

$$I_1 = \frac{E - U_{24}}{R_{\text{к}}}.$$

В более общем виде для ветви, содержащей несколько источников э.д.с.  $m$  и резисторов  $n$ :

$$I = \frac{\varphi_2 - \varphi_4 + \sum_{j=1}^m E_j}{\sum_{i=1}^n R_i},$$

где  $\sum_{j=1}^m E_j$  – алгебраическая сумма э.д.с, находящихся в данной ветви;

$\sum_{i=1}^n R_i$  – арифметическая сумма сопротивлений ветви.

Эту формулу называют *обобщенным законом Ома*.

Для замкнутой одноконтурной цепи

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю:



$$\sum_{n=1}^m I_n = 0.$$

При этом токи, направленные к узлу, берем со знаком плюс, а токи, направленные от узла, – со знаком минус. Так, для узла 2 на рис. 1.18, б:  $I_1 - I_3 - I_2 = 0$ .

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений всех участков замкнутого контура равна нулю ( $\sum_{i=1}^m U_i = 0$ ) для

схем, не содержащих источников э.д.с. Применительно к схемам замещения с источниками э.д.с. алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме э.д.с, входящих в этот контур:

$$\sum_{j=1}^m R_j I_j = \sum_{i=1}^n E_i.$$

При этом слагаемые берут со знаком «+» в случае, когда направление обхода контура совпадает с направлением соответственно напряжения, тока или э.д.с.; в противном случае слагаемые берут с отрицательным знаком. Например, для контура 1–2–3–4 (см. рис. 1.18, б):

$$R_K I_1 + (R_6 + R_{д1}) \cdot I_2 = E,$$

для контура 2–3–4–5–6:

$$R_6 I_2 + R_{д1} I_2 - R_{д2} I_3 - R_{п} I_3 - R_B I_3 = 0.$$

Рекомендуем следующий порядок расчета по МНПЗК:

1. Обозначение узлов схемы и ее ветвей.
2. Обозначение условно-положительных направлений (УНП) токов и напряжений.
3. Составление уравнений по законам Ома и Кирхгофа:
  - определение числа ветвей ( $p$ );
  - определение числа узлов ( $q$ );
  - определение числа независимых контуров ( $p - q + 1$ );
  - определение числа независимых уравнений по первому закону Кирхгофа ( $q - 1$ );
  - определение числа независимых уравнений по второму закону Кирхгофа, равного числу независимых контуров ( $p - q + 1$ );
  - проверка: общее количество уравнений должно быть равно количеству неизвестных токов.

4. Решение системы уравнений, нахождение неизвестных.

5. Проверка правильности решения (расчета токов в ветвях цепи) по балансу мощностей источников и приемников электрической энергии:  $\sum EI = \sum RI^2$ .

Преимущество метода эквивалентных преобразований (МЭП) пассивных участков цепи заключается в постепенном упрощении схемы. Различают следующие основные виды соединений элементов: *последовательное, параллельное, треугольником и звездой*.

В схеме замещения одноплазмотронной печи  $R_B, R_{II}, R_{д2}$  соединены последовательно, т.е. ток  $I_3$  в каждом из сопротивлений один и тот же. В этом случае участок 2–6–5–4 с последовательным соединением может быть заменен эквивалентным сопротивлением:  $R_{эKB1} = R_B + R_{II} + R_{д2}$ ; аналогично  $R_{эKB2} = R_6 + R_{д1}$ .

Сопротивления  $R_B, R_{II}, R_{д2}$  соединены с сопротивлениями  $R_6$  и  $R_{д1}$  параллельно, так как присоединены к одной паре узлов и находятся под воздействием одного и того же напряжения.

Эквивалентное сопротивление в данном случае:

$$\frac{1}{R_{эKB}} = \frac{1}{R_{эKB1}} + \frac{1}{R_{эKB2}} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{R_i},$$
$$\frac{1}{R_{эKB}} = \frac{1}{R_B + R_{II} + R_2} + \frac{1}{R_6 + R_1},$$

Для эквивалентной проводимости:

$$G_{эKB} = G_{эKB1} + G_{эKB2} = \sum G_{эKB_i},$$

где  $G_{эKB} = 1 / R_{эKB}$ , См (Сименс; 1 См = 1 / Ом);  $R_{эKB} = 1 / G_{эKB}$ .

При смешанном соединении используют метод эквивалентных преобразований, заменяя параллельно и последовательно включенные резисторы эквивалентными сопротивлениями до получения последовательной цепи, параметры которой определяют по закону Ома. Например, для цепи на рис. 1.18, б сначала находим  $R_{эKB1}$  и  $R_{эKB2}$  каждой из параллельных ветвей, затем эквивалентное сопротивление  $R_{эKB}$  двух параллельных ветвей. Получим последовательную цепь с  $E, R_k$  и  $R_{эKB}$ . Определяем эквивалентное сопротивление последовательной цепи  $R'_{эKB} = R_{эKB} + R_k$ , а далее – ток по закону Ома,  $I = E / R'_{эKB}$ .

В сложных цепях возможны соединения элементов, отличающиеся от последовательного и параллельного, например, *мосто-*

вые, которые характерны для вторичных измерительных приборов, контролирующих, в частности, температуру металла или рабочей среды. Величина электрического сопротивления  $R_{ad}$  теплопринимающего элемента  $R_t$  (рис. 1.24, а) является мерой температуры, при которой он находится, а положение стрелки показывающего прибора П на шкале Ш в градусах Цельсия соответствует этой температуре. Для решения таких задач преобразуют треугольник сопротивлений, например  $abc$  (рис. 1.24, б), в эквивалентную звезду. При этом:

$$R_a = \frac{R_{ac}R_{ab}}{R_{ac} + R_{ab} + R_{bc}};$$

$$R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ac} + R_{ab} + R_{bc}};$$

$$R_c = \frac{R_{ac}R_{bc}}{R_{ac} + R_{ab} + R_{bc}}.$$

Обратное преобразование из звезды в треугольник (рис. 1.24, в) осуществляют по выражениям:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c};$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a};$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}.$$

При анализе более сложных линейных цепей постоянного тока металлургических установок наряду с перечисленными применяют другие, более удобные методы расчета.

Предположим, что в инженерной практике возникла необходимость увеличить рабочий ток при неизменном напряжении питания двигателей привода наклона конвертера или ДВП, а в распоряжении имеется несколько однотипных источников питания, каждый на менее чем нужно, номинальный ток. В этом случае источники включают параллельно (рис. 1.25) на одного или нескольких потребителей.

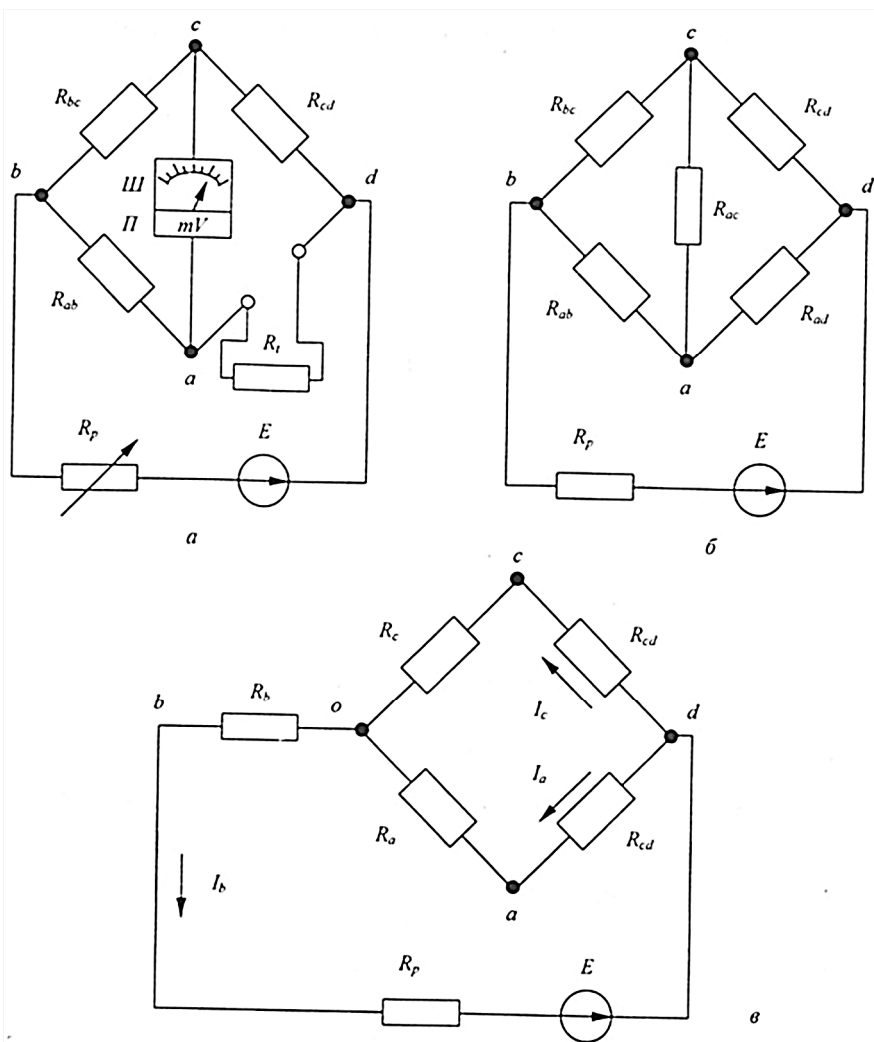


Рис. 1.24. Измерительное устройство (а), его схема замещения (б) при соединении сопротивлений в треугольник  $abc$  и после преобразования треугольника в эквивалентную звезду  $abco$  (в)

Расчет такой цепи, имеющей только два узла ( $A, B$ ), и определение параметров ее элементов удобно осуществлять методом двух узлов. В любую ветвь с источником э.д.с. (тока) могут быть включены резисторы с сопротивлением  $R$ . В простейшем случае ими могут быть

внутренние сопротивления источников ( $R_0$ ). На зажимах эквивалентного приемника с сопротивлением  $R_m$ , например дуги, действует напряжение  $U_{AB}$ . Его называют *междуузловым*.

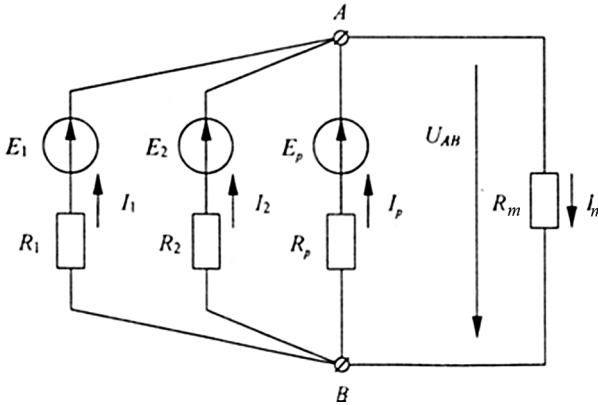


Рис. 1.25. Схема замещения цепи с параллельно включенными источниками

### Порядок расчета

1. Обозначим узлы и ветви схемы. В схеме два узла –  $A$  и  $B$ ,  $p$  – активных ветвей,  $m$  – пассивных ветвей.

2. Выбираем условно-положительные направления токов и напряжений. Например, в ветвях с источниками э.д.с. направления токов к узлу  $A$ , а в ветвях с пассивными элементами – к узлу  $B$ . Соответственно, за положительное направление напряжения принимаем  $U_{AB}$  (от узла  $A$  к узлу  $B$ ).

3. Находим напряжение  $U_{AB}$  между узлами по формуле двух узлов:

$$U_{AB} = \frac{\sum_1^p G_k E_k}{\sum_1^p G_k + \sum_1^q G_p},$$

т.е. эквивалентная э.д.с, замещающая э.д.с. параллельных ветвей, равна алгебраической сумме произведений проводимостей ветвей на соответствующие значения э.д.с. (плюс токи источников тока  $\sum J$ , если они есть), деленной на арифметическую сумму проводимостей всех ветвей, включая проводимости пассивных ветвей. При этом

э.д.с.  $E$  ветви берут со знаком «+», если ее направление не совпадает с направлением  $U_{AB}$ .

4. Выражаем искомые величины (токи в ветвях) через напряжение между узлами  $U_{AB}$ :

$$I_1 = \frac{-U_{AB} + E_1}{R_1}.$$

Напряжение  $U_{AB}$  берут со знаком «-», если его направление не совпадает с направлением тока  $I_1$  в данной ветви:

$$I_2 = \frac{-U_{AB} + E_2}{R_2};$$

$$I_p = \frac{-U_{AB} + E_p}{R_p};$$

$$I_m = \frac{U_{AB}}{R_m}.$$

5. Проверка по уравнению баланса мощностей.

#### 1.4. Нелинейные цепи постоянного тока

Рассмотренные выше методы расчета и анализа цепей постоянного тока справедливы для линейных элементов, подчиняющихся закону Ома и имеющих линейную ВАХ. Это обусловлено тем, что сопротивление элемента постоянно при изменении тока в нем и любом значении приложенного к нему напряжения.

Однако в реальных условиях имеют дело главным образом с нелинейными элементами, сопротивление которых меняется при изменении значения или направления тока и напряжения. ВАХ нелинейного элемента – кривая линия. Это распространяется на многие электротехнические устройства. Например, в ДВП увеличение рабочего тока сопровождается увеличением температуры всех токопроводящих элементов, электрической дуги и металлической ванны.

В цепях источников питания и регулирования нелинейными элементами являются электронные лампы, терморезисторы, полупроводниковые диоды и транзисторы и т. д. Нелинейность в цепях постоянного тока металлургических установок имеет электрическая дуга, являющаяся преобразователем электроэнергии в тепловую.

Дуга  $D$  постоянного тока является разновидностью электрического разряда в газе; возникает между двумя электродами – катодом  $K$  и

анодом  $A$ , на которые от источника питания – выпрямителя  $B$  – подводят соответственно положительный и отрицательный потенциалы (рис. 1.26). Зажигание дуги в промышленных печах производят после короткого замыкания, осуществляемого подъемом электрода  $K$  от переплавляемого металла  $A$  или пробоем промежутка между анодом и катодом с помощью высоковольтного высокочастотного разряда осциллятором  $OC$ , который включают в силовую цепь последовательно или параллельно.

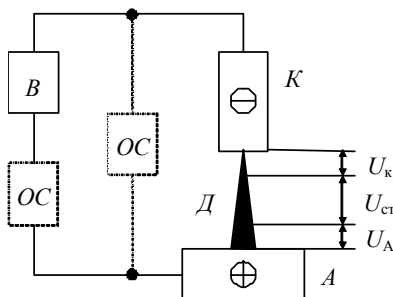


Рис. 1.26. Схема цепи с дугой постоянного тока

Первый способ применяют в дуговых установках, использующих в качестве электрода  $K$  графитированный стержень, – дуговых плавильных печах постоянного тока, комбинированных индукционно-дуговых печах, при подогреве жидкого металла в ковше, промежуточной емкости УНРС, прибыльной части слитка.

Второй способ распространен в печах с дуговыми плазматронами, где касание вольфрамовым катодом металла исключено.

В дуговом разряде различают три области: столб дуги с падением напряжения  $U_{ст}$ , являющийся основным преобразователем электрической энергии в тепловую; прикатодную область с падением напряжения  $U_k$ , которая обеспечивает переход от высокой температуры газа в столбе дуги (до 20000 К) к относительно холодному катоду (до 2000 К); прианодную область с падением напряжения  $U_A$ , выполняющую примерно ту же задачу.

Для дуги высокого давления, горящей в газе или паре, с плотностями, которые соответствуют давлениям выше 1000 Па, атмосферному давлению, характерно наличие ограниченного столба с высокой температурой газа (4000...20000 К). В нем существует тепловое равновесие между электронами, положительными ионами и нейтральными атомами и молекулами.

Температурную (боковую) границу столба определяют при динамическом равновесии, когда количество частиц, образовавшихся в процессах диссоциации и ионизации, соответствует числу рекомбинированных частиц. Протяженность приэлектродных областей мала (до 5 мм), причем с ростом тока она уменьшается, а при определенной его величине (500...1000 А) анодная область исчезает и столб дуги, опираясь на жидкую металлическую ванну, «горит» в парах металла. В этом случае атомарные частицы газа поступают в ванну и появляется возможность легировать жидкий металл азотом, окислять кислородом или раскислять водородом более интенсивно, чем при подаче материалов в шихту или ванну.

С увеличением тока высокотемпературная область столба дуги расширяется по диаметру, а катодное пятно уходит от оси разряда на боковую поверхность графитированного катода, диаметр которого на ряде печей достигает 600 мм, что сопровождается снижением устойчивости горения дуги и неравномерным износом электрода. Поэтому для промышленных печей постоянного тока электрод-катод могут изготавливать в виде водоохлаждаемого металлического стержня-трубы 1 (рис. 1.27) с навинчивающимся снизу полым графитированным наконечником 2. Это стабилизирует горение дуги с нижнего торца 3 электрода ближе к отверстию; позволяет подавать легирующие, раскислители и газы через отверстие, нагревая их; снижает расход электродов с 2 кг/т для сплошного катода до 0,5 кг/т при подаче аргона; обеспечивает герметичность печи.

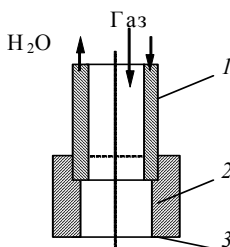


Рис. 1.27. Схема катода

В зависимости от вида дугового разряда создают различные типы металлургических печей, характеризующихся специфическими технологическими возможностями. Статическая вольтамперная характеристика дуги постоянного тока, горящей при атмосферном давлении между графитированным электродом и расплавленным металлом, стабилизированная подачей аргона через осевое отверстие в