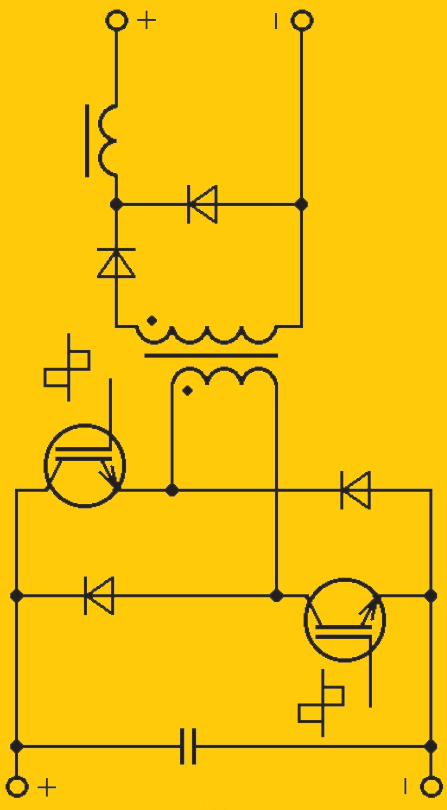
Володин В. Я.





# СОЗДАЕМ СОВРЕМЕННЫЕ СВАРОЧНЫЕ АППАРАТЫ

УДК 621.791.03
ББК 34.641-5
В68

Володин В. Я.
В68 Создаем современные сварочные аппараты. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 352 с.

ISBN 978-5-94074-671-3

Появившись более ста лет назад, электродуговая сварка произвела технологическую революцию. К настоящему времени она практически вытеснила все остальные технологии сварки металла. В книге приводятся необходимые сведения по ручной и полуавтоматической электродуговой сварке, а также, в порядке усложнения, — описания различных сварочных источников, пригодных для повторения.

Повествование сопровождается необходимыми методиками расчета, схемами и чертежами. Большое внимание уделяется компьютерному моделированию с помощью популярной бесплатной программы LTspice.

Следуя авторским рекомендациям, читатели смогут самостоятельно сконструировать и изготовить сварочные аппараты для ручной и полуавтоматической сварки, а желающие приобрести готовое устройство — сделать правильный выбор.

Книга предназначена для широкого круга домашних мастеров, радиолюбителей, интересующихся вопросами силовой электроники и электросварки.

УДК 621.791.03
ББК 34.641-5

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-94074-671-3

© Володин В. Я., 2011
© Оформление, ДМК Пресс, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

**Глава 1**
**Немного истории** ... 11

1.1. Изобретение электросварки ... 11
1.2. Развитие электросварки в 20 веке ... 14

**Глава 2**
**Основы дуговой сварки** ... 16

2.1. Электрическая дуга ... 16
Физическая сущность ... 16
Вольтамперная характеристика ... 17
Ручная сварка на постоянном токе ... 18
Полуавтоматическая сварка на постоянном токе ... 18
Сварка на переменном токе ... 18
2.2. Процесс сварки ... 19
Сварка неплавящимся электродом ... 20
Сварка плавящимся электродом ... 20
Перенос металла ... 22
2.3. Основные характеристики источников питания сварочной дуги ... 23

**Глава 3**
**Симулятор LTspice IV** ... 25

3.1. Моделирование работы источника питания ... 25
Возможности моделирования ... 25
Программы моделирования электронных схем ... 25
Возможности программы LTspice IV ... 26
3.2. Работа программы LTspice IV ... 28
Запуск программы ... 28
Рисуем на ПК схему простейшего мультивибратора ... 29
Определение числовых параметров и типов компонентов схемы ... 33

Моделирование работы мультивибратора ..... 37
3.3. Моделирование простейшего источника питания ..... 44
Низковольтный источник постоянного тока ..... 44
Тестовый узел ..... 54

**Глава 4**
**Сварочные источники переменного тока** ..... 57

4.1. Особенности терминологии ..... 57
4.2. Основные требования к сварочному источнику ..... 58
4.3. Модель электрической дуги переменного тока ..... 59
4.4. Сварочный источник с балластным реостатом (активным сопротивлением) ..... 61
4.5. Сварочный источник с линейным дросселем (индуктивным сопротивлением) ..... 63
4.6. Сварочный трансформатор ..... 64
4.7. Как рассчитать индуктивность рассеяния? ..... 67
Индуктивность рассеяния трансформатора с цилиндрическими обмотками ..... 67
Индуктивность рассеяния трансформатора с разнесенными обмотками ..... 69
Индуктивность рассеяния трансформатора с дисковыми обмотками ..... 74
4.8. Требования к сварочному трансформатору ..... 75
4.9. Классический источник переменного тока ..... 76
Расчет сварочного трансформатора с развитым магнитным рассеянием ..... 76
Расчет индуктивности рассеяния ..... 80
Конструкция сварочного источника переменного тока ..... 80
4.10. Сварочный источник Буденного ..... 83
Пути уменьшения величины потребляемого тока ..... 83
Конструктивно-электрическая схема сварочного источника Буденного ..... 86
Общие принципы проектирования сварочного источника ..... 87

Модель сварочного источника Буденного ..... 89
Преодоление конструктивных ограничений сварочного источника Буденного ..... 94
Определение габаритной мощности трансформатора ..... 95
Выбор сердечника ..... 96
Расчет обмоток ..... 97
Расчет магнитного шунта ..... 99
Расчет индуктивности рассеяния ..... 100
Моделирование результатов расчета ..... 100
Конструкция сварочного источника с альтернативной конструкцией трансформатора ..... 104
4.11. Сварочный источник с резонансным конденсатором ..... 107
Расчет сварочного источника с резонансным конденсатором ..... 109
Расчет сварочного трансформатора ..... 111
Проверка размещения обмоток в окне сварочного трансформатора ..... 112
Расчет индуктивности рассеяния ..... 113
Моделирование сварочного источника ..... 114
4.12. Стабилизаторы дуги переменного тока ..... 118
Особенности сварочной дуги переменного тока ..... 118
Принцип действия стабилизатора дуги ..... 119
Первая версия стабилизатора дуги ..... 120
Детали ..... 124
Вторая версия стабилизатора дуги ..... 125
Детали ..... 128

**Глава 5**
**Сварочный источник для полуавтоматической сварки** ..... 129

5.1. Основы полуавтоматической сварки ..... 129
5.2. Расчеты элементов схемы ..... 132
Определение параметров и расчет силового трансформатора источника ..... 132

Процедура настройки модели ..... 135
Расчет омического сопротивления обмоток ..... 135
Расчет индуктивности и сопротивления обмоток трансформатора ..... 136
Расчет габаритных размеров трансформатора ..... 138
Завершение расчета трансформатора ..... 139
Расчет дросселя источника подпиточного тока ..... 140
5.3. Описание конструкции простого источника для полуавтоматической сварки ..... 141
Схема простого источника для полуавтоматической сварки ..... 141
Детали для сварочного полуавтомата ..... 143
Конструкция и изготовление сварочного трансформатора ..... 144
Конструкция дросселя ..... 145
Подключение источника ..... 146

**Глава 6**
**Сварочный источник для полуавтоматической сварки с тиристорным регулятором** ..... 147

6.1. Регулировка сварочного тока ..... 147
6.2. Обеспечение непрерывности сварочного тока ..... 148
6.3. Расчет сварочного трансформатора ..... 155
6.4. Блок управления ..... 157
6.5. Описание конструкции сварочного источника с тиристорным регулятором ..... 158
Принципиальная электрическая схема ..... 158
Детали ..... 160
Конструкция сварочного трансформатора ..... 160
Конструкция дросселя ..... 162
Подключение источника ..... 162

**Глава 7**
**Электронный регулятор сварочного тока** ..... 163

7.1. Многопостовая сварка ..... 163

Многопостовая сварка с подключением
через индивидуальный балластный реостат ....163
Электронный аналог балластного реостата ЭРСТ ....163
7.2. Расчет основных узлов ЭРСТ ....165
7.3. Описание ЭРСТ ....176
Основные варианты защиты ....176
Назначение основных узлов ЭРСТ ....177
Принцип действия ....177
Принцип работы и настройка блока А1 ....178
Детали ....180
Принцип работы и настройка блока А2 ....181
Принцип действия стабилизатора ....182
Детали ....188
Настройка ....188
Формирование внешних характеристик ЭРСТ ....189
Принцип работы блока управления ЭРСТ ....190
Принцип работы блока драйвера ключевого транзистора ....192
Завершающая настройка ЭРСТ ....194

**Глава 8**
**Инверторный сварочный источник** ....196

8.1. Немного истории ....196
8.2. Общее описание источника ....197
8.3. Рекомендации для самостоятельного изготовления ИСИ ....201
8.4. Расчет трансформатора прямоходового преобразователя ....203
8.5. Изготовление трансформатора ....210
8.6. Расчет мощности потерь на транзисторах преобразователя ....210
8.7. Расчет дросселя фильтра сварочного тока ....214
8.8. Моделирование работы преобразователя ....216
8.9. Расчет трансформатора тока ....217
8.10. Расчет трансформатора гальванической развязки ....219
8.11. ШИМ-контроллер TDA4718A ....221

8.12. Принципиальная схема блока управления инверторного сварочного источника «RytmArc» ..... 225
8.13. Формирование нагрузочной характеристики источника ..... 230
8.14. Методика настройки БУ ..... 233
8.15. Выносной пульт управления (модулятор) ..... 234
8.16. Использование альтернативного ШИМ-контроллера ..... 239
8.17. Трансформаторный драйвер ..... 244
8.18. Демпфирующая цепь, не рассеивающая энергию ..... 248

**Глава 9**
**Инверторный сварочный источник COLT-1300** ..... 254

9.1. Общее описание ..... 254
О чем эта глава ..... 254
Назначение ..... 254
Основные характеристики ..... 255
9.2. Силовая часть ..... 255
Данные моточных узлов ..... 260
9.3. Блок управления ..... 262
Функциональная схема ..... 262
Принцип действия ..... 263
Принципиальная схема ..... 265
Реализация функции Anty-Stick ..... 265
Реализация функции Arc Force ..... 267
9.4. Настройка ..... 267

**Глава 10**
**Полезная информация** ..... 268

10.1. Как испытать неизвестное железо? ..... 268
10.2. Как рассчитать трансформатор? ..... 269
10.3. Как рассчитать дроссель с сердечником? ..... 276
Особенности расчета ..... 276
Пример расчета дросселя № 1 ..... 279

Пример расчета дросселя № 2 ..... 280
Пример расчета дросселя № 3 ..... 283
10.4. Расчет дросселей с порошковым сердечником ..... 285
Преимущества порошковых сердечников ..... 285
Адрес программы Inductor Design Software и ее установка ..... 288
Функции автоматического расчета программы Inductor Design Software ..... 289
Дополнительные функции программы Inductor Design Software ..... 298
Панель меню программы Inductor Design Software ..... 299
Пример расчета дросселя в программе Inductor Design Software ..... 302
Программа Magnetics Inductor Design Using Powder Cores ..... 307
Пример расчета дросселя в программе Magnetics Inductor Design Using Powder Cores ..... 310
10.5. Как рассчитать радиатор? ..... 312
10.6. Гистерезисная модель нелинейной индуктивности симулятора LTspice ..... 317
Краткое описание гистерезисной модели нелинейной индуктивности ..... 317
Подбор параметров гистерезисной модели нелинейной индуктивности ..... 322
10.7. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи LTspice ..... 330
Проблема моделирования ..... 330
Принцип подобия электрических и магнитных цепей ..... 331
Двойственность физических цепей ..... 333
Модель неразветвленной магнитной цепи ..... 334
Моделирование разветвленной магнитной цепи ..... 337
Моделирование сложной магнитной цепи ..... 338
Адаптация модели для магнитных цепей, работающих с частичным или полным подмагничиванием ..... 340
Создание модели интегрированного магнитного компонента ..... 343

10.8. Как изготовить сварочные электроды? ..... 346

**Приложение** ..... 349

1. Параметры командной строки программы LTspice IV ..... 349
2. Перечень схемных элементов симулятора LTspice IV (таблица 2) ..... 350

ГЛАВА 1

# НЕМНОГО ИСТОРИИ

## 1.1. Изобретение электросварки

С момента своего появления человек наблюдал мощные атмосферные электрические разряды — молнию. Еще не имея понятия о физической природе этих разрядов, человек мог наблюдать их световое и тепловое воздействие. Но прошло очень много лет, прежде чем наука, созданная человеком, позволила ему вплотную приблизится к изучению и практическому использованию электрической энергии для целей разогрева и плавления металлов.

**Главной проблемой** было отсутствие достаточно мощного источника электрической энергии. Первыми искусственными источниками электрической энергии были различные электростатические генераторы. С одним из этих генераторов — **электрофорной машиной** — мы знакомы со школьных уроков физики.

Подобные генераторы обеспечивали высокое напряжение при весьма низкой плотности энергии и не подходили для изучения теплового действия тока. Попытка использования для экспериментов атмосферного электричества закончилась трагически. В 1753 году в Петербурге во время эксперимента с молнией погиб русский ученый Георг Вильгельм Рихман, работавший вместе с Ломоносовым.

В 1800 году итальянским ученым Алессандро Вольта был изобретен первый **химический источник тока**. Это был **элемент Вольта**, который представлял из себя сосуд с соленой водой с опущенными в него цинковой и медной пластинками, соединенными проволокой. Затем ученый собрал батарею из этих элементов, которая впоследствии была названа **Вольтовым столбом** (**рис. 1.1**).

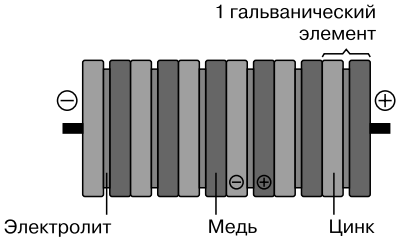



***Рис. 1.1**. Вольтовый столб*

Вольтовый столб мог обеспечить большую мощность по сравнению с

электрофорной машиной. Благодаря этому, изобретение Вольта впоследствии использовали многие другие ученые в своих исследованиях. В 1802 году русский ученый Василий Владимирович Петров с помощью созданного им крупнейшего для того времени вольтового столба смог зажечь электрическую дугу между двумя кусочками древесного угля.

До В. В. Петрова электрический свет наблюдали лишь во вспышке молнии, а теперь он горел непрерывно. **Электрическая дуга** была первым источником непрерывного электрического света, в качестве которого достаточно долго использовалась. Кроме светового действия, он отметил и тепловое действие дуги.

В процессе экспериментов, заменив один из угольков металлической проволокой, В. В. Петров заметил, что при сближении угля с проволокой между ними вспыхивает электрическая дуга, которая быстро плавит металлическую проволоку. Так ученый пришел к другому очень важному выводу — **о возможности использования электрической дуги для плавления металлов**.

К сожалению, химические источники тока не позволяли в достаточном количестве вырабатывать электроэнергию, и практическое использование электрической дуги было отложено. Потребовались годы совместных усилий ученых всего мира, направленных на создание мощных, экономичных и удобных в эксплуатации электрических генераторов.

С первой половиной XIX столетия связано множество изобретений в области электротехники. В 1831 г. знаменитым английским ученым М. Фарадеем был открыт **принцип электромагнитной индукции**. Согласно этому принципу, открывалась возможность *преобразования механического движения в электрический ток*. Фарадеем был создан первый **электромашинный генератор** (**рис. 1.2**), а также прообраз современного трансформатора.

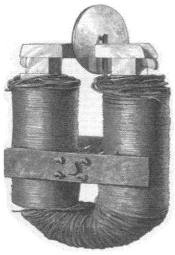


***Рис. 1.2.*** *Электромашинный генератор Фарадея*

Использование электромашинных генераторов вместо химических источников тока послужило толчком для использования электричества в промышленности. В свою очередь, быстро развивающаяся промышленность нуждалась в технологии, позволяющей осуществлять быстрое и дешевое сваривание металлов. Старые кузнечные методы сварки и клепки занимали много времени, не обеспечивали необходимого качества и прочности соединения.

С середины XIX в. внимание ученых и изобретателей во многих странах было обращено на применение высокой температуры электрической дуги для сваривания и плавления металлов. Но только спустя 80 лет с момента открытия электрической дуги, в 1882 году, талантливому русскому изобретателю **Николаю Николаевичу Бенардосу** удалось разработать промышленно пригодный способ электродуговой сварки металлов. Сварка способом Бенардоса (**рис. 1.3**) велась с присадочным прутком, расплавляемым в пламени дуги, горящей между электродом (угольным, графитовым или вольфрамовым) и изделием.

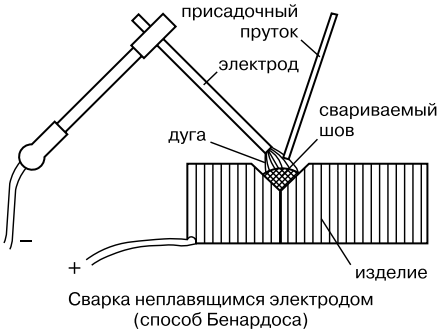



***Рис. 1.3.*** *Сварка способом Бенардоса*

Данный способ используется и сейчас для сварки цветных металлов, а также при наплавке твердых сплавов. Для питания сварочной дуги Н. Н. Бенардос использовал аккумуляторы собственной конструкции, которые заряжались от электрического генератора.

К сожалению, швы, сваренные по технологии Бенардоса, получались ломкими и хрупкими. Источником неудач являлся угольный электрод, с которого углерод проникал в сварочную ванну и ухудшал качество металла сварного шва.

В 1888 году русский инженер-изобретатель Николай Гаврилович Славянов разработал новый способ сварки при помощи металлического плавящегося электрода (**рис. 1.4**).

Замена графитового электрода металлическим позволила значительно улучшить качество сварки. Для питания сварочной дуги Н. Г. Славянов использовал электрическую динамомашину собственной конструкции.

Ближе к концу XIX века в промышленности все в больших масштабах стал использоваться переменный ток, который со временем повсеместно вытеснил ток постоянный.

Напряжение переменного тока можно было легко преобразовывать

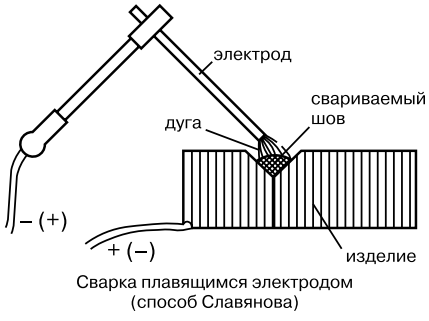



***Рис. 1.4.*** *Сварка способом Славянова*

при помощи трансформаторов, что существенно упрощало его транспортировку к потребителю. К тому же генераторы переменного тока имели более простую конструкцию и меньшую стоимость. Однако переменный ток был неудобен для электросварки — электрическая дуга горела неустойчиво.

Проблема была решена с помощью **специальной обмазки**, которой покрывался металлический электрод. Обмазка плавилась вместе с электродом, ее пары ионизировали дуговой промежуток, что облегчало повторное зажигание дуги. Первые конструкции электродов, содержащих покрытия, были созданы Н. Н. Бенардосом. Покрытые электроды современного вида изобретены шведским инженером Кельбергом в 1911 году.

## 1.2. Развитие электросварки в 20 веке

Сейчас по технологии Славянова производится наиболее массовый вид сварки — это ручная сварка **штучными металлическими электродами**. Данный тип сварки обозначается аббревиатурой **ММА (Manual Metal Arc)**.

При дуговой сварке атмосферный кислород и азот активно взаимодействуют с расплавленным металлом, образуют окислы и нитриды, которые снижают прочность и пластичность сварного соединения. Идея защиты сварочной ванны специальными флюсами принадлежит Н. Г. Славянову, впервые применившему в качестве флюса дробленое стекло.

В 1936 году американская фирма «Линде» получила патент на способ сварки стали под слоем порошкообразных, расплавляющихся при сварке веществ. В СССР сварка под расплавляющимися флюсами была разработана и внедрена в промышленность в 1938—1940 годах Институтом электросварки АН УССР (ныне имени Евгения Оскаровича Патона). Именно этот способ сварки позволил наладить массовый выпуск бронетехники во время Великой Отечественной войны 1941—1945 годов.

**Сварка в струе защитных газов** изобретена Н. Н. Бенардосом. Защита от воздуха, по его предложению, осуществлялась светильным газом. В период Второй мировой войны в США получила развитие сварка в струе аргона или гелия неплавящимся вольфрамовым элек-

тродом и плавящимся электродом (**рис. 1.5**).

Этим способам сварки присвоена аббревиатура **TIG** и **MIG**. **TIG** (**Tungsten Inert Gas**) — сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертного защитного газа, **например** так называемая **аргонно-дуговая сварка**.

**MIG (Mechanical Inert Gas)** — механизированная (полуавтоматическая или автоматическая) сварка в струе инертного защитного газа.

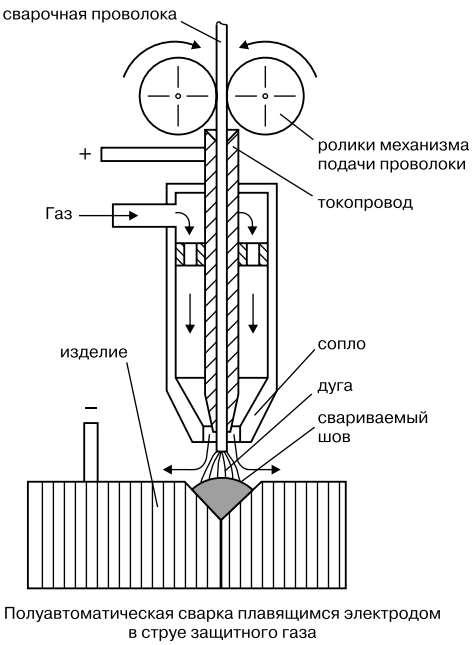



***Рис. 1.5.*** *Сварка в среде инертного газа*

В 1952 году К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым была изобретена специальная **легированная проволока**, применение которой позволило осуществлять сварку плавящимся электродом в среде углекислого газа. Этому способу сварки присвоена аббревиатура **MAG**. **MAG (Mechanical Active Gas) — механизированная (полуавтоматическая или автоматическая) сварка в струе углекислого (активного) газа.** Именно этот способ сварки нашел в настоящее время широкое применение в автосервисе.

Практически до середины XX века в качестве источников питания сварочной дуги использовались **специализированные сварочные генераторы** и **трансформаторы**. Соответственно, первые предназначались для сварки постоянным током, а последние — для сварки переменным током. Параметры источника достаточно жестко определялись его конструкцией, и поэтому каждый источник предназначался для определенного типа сварки. Успехи силовой электроники в 1960-е и последующие годы позволили создавать универсальные и компактные сварочные источники с улучшенными характеристиками.

ГЛАВА 2

# ОСНОВЫ ДУГОВОЙ СВАРКИ

## 2.1. Электрическая дуга

### Физическая сущность

**Определение.**
***Электрической дугой*** *называется мощный длительный электрический разряд в среде ионизированных газов между электродами, находящимися под напряжением.*

Процесс возбуждения дуги начинается с соприкосновения электродов между собой. В момент размыкания электродов между ними проскакивает **искра**, которая ионизирует газ в межэлектродном пространстве, создавая **канал проводимости**.

Под действием электрического поля электроны в ионизированной газовой среде перемещаются от катода к аноду, развивая при этом значительную скорость. Сталкиваясь с нейтральными атомами газа и выбивая из них электроны, они производят непрерывную ионизацию газового пространства.

При этом выделяется большое количество тепла. Газ в дуговом промежутке нагревается до температуры 5000—7000 °С и находится в состоянии плазмы. В свою очередь, образовавшиеся положительные ионы движутся к катоду и, отдавая ему свою энергию, вызывают сильный нагрев электрода, образуя при этом катодное пятно. Электроны, прошедшие дуговой промежуток, ударяются о положительный электрод (анод), отдавая ему свою энергию, образуя при этом анодное пятно.

Схематически электрическая дуга изображена на **рис. 2.1**.

Зажигание дуги может происходить и без первичного короткого замыкания, если между электродами при помощи высоковольтного генератора-осциллятора кратковременно приложить высокое напряжение, достаточное для электрического пробоя межэлектродного слоя газа.

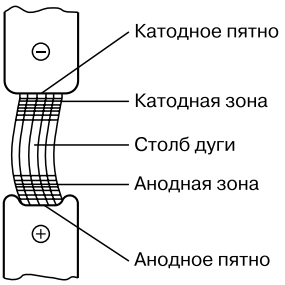



***Рис. 2.1.*** *Электрическая дуга*

Электроны, обладая меньшей массой, двигаются в дуге значительно быстрее. Поэтому в дуге преобладает электронный ток, направленный от катода к аноду. Вследствие преобладания электронного тока, количество тепла, выделяемого электронами на аноде, больше, чем на катоде.

Сказанное подтверждается экспериментальными данными, согласно которым выделяется:

- на аноде — 43 % тепла;
- на катоде — 36 % тепла;
- в столбе дуги — 21 % тепла.

## Вольтамперная характеристика

На **рис. 2.2** приведена статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) электрической дуги.

Из **рис. 2.2** видно, что ВАХ дуги имеет три участка, соответствующие различным плотностям тока в сварочном электроде:

- **нисходящий участок**, соответствующий малой плотности тока;
- **горизонтальный участок**, соответствующий средней плотности тока;
- **восходящий участок**, соответствующий большой плотности тока.




***Рис. 2.2.*** *Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги*

### Ручная сварка на постоянном токе

При **ручной сварке на постоянном токе** процесс протекает *на среднем участке* статической вольтамперной характеристики дуги. На этом участке напряжение дуги зависит:

- от длины дуги;
- от газового состава;
- от величины сварочного тока.

Напряжение дуги при ручной сварке (с точностью, достаточной для практического применения) можно найти по эмпирической формуле

$$U_д = 20 + 0{,}04 \cdot I_{св}, \qquad (1)$$

где $I_{св}$ — сварочный ток, А.

### Полуавтоматическая сварка на постоянном токе

При **полуавтоматической сварке на постоянном токе** процесс протекает *на восходящем участке* статической вольтамперной характеристики дуги.

Напряжение дуги при полуавтоматической сварке можно определить по эмпирической формуле

$$U_д = K_г + 0{,}05 \cdot I_{св}, \qquad (2)$$

где $K_г$ — коэффициент, зависящий от типа защитного газа.

**Например.**

*Для углекислого газа $K_г = 14$, а для смеси аргона с углекислым газом $K_г = 11$.*

### Сварка на переменном токе

Если дуга включена **в цепь переменного тока** промышленной частоты, то процесс горения дуги протекает *на нисходящем и горизонтальном участках* ее вольтамперной характеристики. В дуге переменного тока напряжение и ток непрерывно меняют свои значения и направления.

При переходе тока через нулевое значение дуга гаснет, и температура дугового промежутка снижается. Это вызывает **деионизацию** дугового промежутка. В таких условиях для стабилизации процесса горения дуги надо принимать определенные меры.

**Внимание.**
*Величина напряжения холостого хода ограничивается соображениями безопасности. Согласно ГОСТ95-77Е, максимальное действующее напряжение сварочного источника не должно превышать 80 В.*

Одной из основных мер является применение **специальных электродов** переменного тока, в состав защитного покрытия которых входят элементы, имеющие низкие потенциалы ионизации. Устойчивость дуги улучшается также при повышении напряжения холостого хода (напряжение на выходе источника при отключенной нагрузке) сварочного источника. Однако увеличение напряжения холостого хода сварочного источника приводит к увеличению массы и габаритов последнего.

Но при этом напряжение холостого хода должно быть не менее, чем в 1,8—2,5 раза больше напряжения дуги.

Общепринятой мерой повышения стабильности дуги переменного тока является включение в сварочную цепь последовательно с дугой **индуктивного сопротивления**, которое также может использоваться для регулировки сварочного тока. В этом случае достаточно, чтобы напряжение холостого хода сварочного источника равнялось 60—65 В.

В условиях пониженной ионизации дугового промежутка повторное зажигание дуги происходит при напряжении зажигания большем, чем напряжение дуги. Стабилизирующее действие индуктивности объясняется наличием **фазового сдвига** между напряжением и током в сварочной цепи переменного тока. Благодаря этому сдвигу, напряжение в момент обрыва дуги близко к своему амплитудному значению, что благоприятно сказывается на повторном зажигании дуги.

## 2.2. Процесс сварки

**Суть сварки.**
*В процессе дуговой сварки нагрев, расплавление и сварка металлов производится теплом электрической дуги, горящей между свариваемым металлом и электродом.*

**Определение.**
*Дуга, горящая между электродом и свариваемым металлом, называется **прямой дугой**. Реже используется тепло **косвенной дуги**, горящей между двумя электродами.*

### Сварка неплавящимся электродом

Для **питания электрической дуги** используется источник постоянного или переменного тока. Сварка может производиться:

- плавящимися электродами;
- неплавящимися электродами.

**Сварку неплавящимся электродом** осуществляют прямой или косвенной дугой. При этом материал электрода практически не участвует в процессе формирования сварочного шва. В этом случае обычно используется вольфрамовый или графитовый (угольный) электрод.

**При использовании графитового (угольного) электрода** питание дуги осуществляется от источника постоянного тока. Сварка производится на прямой полярности (электрод подключен к отрицательному полюсу источника, а свариваемый металл — к положительному).

При использовании **вольфрамового электрода** сварка производится переменным или постоянным током прямой полярности.

**Внимание.**
*При этом обязательной является защита области дуги инертным газом для предотвращения окисления вольфрамового электрода кислородом воздуха.*

### Сварка плавящимся электродом

**Сварка плавящимся электродом** производится дугой, горящей между электродом и свариваемым металлом. Материал электрода используется для формирования сварочного шва. Обычно используются электроды: железные, медные, чугунные.

В состав электродов могут добавляться различные **добавки**, улучшающие качество шва или повышающие устойчивость горения дуги. Электрод подается в зону сварки по мере его плавления. Питание дуги может осуществляться как от источника постоянного, так и от источника переменного тока.

Сварка может производиться как на прямой, так и на обратной полярности. В качестве плавящегося электрода используются:

- штучные сварочные электроды;
- сплошная или порошковая сварочные проволоки.

**При дуговой сварке плавящимся электродом** перенос металла (с электрода на свариваемый металл) определяется воздействием ряда факторов, перечисленных ниже.

**Фактор 1. Испарение и конденсация**. На конце электрода происходит интенсивное выделение тепла, за счет которого часть металла испаряется. Часть испарений рассеивается, но большая часть конденсируется в сварочной ванне, которая имеет более низкую температуру.

**Фактор 2. Сила тяжести**. При сварке в нижнем положении сила тяжести помогает транспортировке расплавленного металла с электрода в сварочную ванну. В других пространственных положениях сила тяжести может препятствовать нормальному переносу металла в сварочную ванну. В этом случае стоит использовать более тонкие электроды, т. к. силы поверхностного натяжения не способны удержать большое количество металла в сварочной ванне.

**Фактор 3. Эффект сжатия (пинч-эффект)**. Вокруг электрической дуги, как возле любого линейного проводника с током, образуется кольцевое магнитное поле. Поскольку ток в дуге протекает перпендикулярно направлению магнитного поля, то на дугу действует сила, направленная к ее центру (радиальная сжимающая сила). Причем если сечение проводящего канала неравномерное, то возникает сила, направленная от меньшего сечения к большему. Эта сила зажимает каплю расплавленного металла и отрывает ее от электрода. Одновременно капле сообщается импульс движения, направленный в сторону сварочной ванны.

**Фактор 4. Поверхностное натяжение**. Силы поверхностного натяжения помогают удерживать расплавленный металл на кончике электрода и в сварочной ванне, а также формируют контуры сварочного шва.

**Фактор 5. Газовый поток в дуге**. Газовые потоки, направленные вдоль оси, экспериментально обнаружены во всех дугах. Как правило, они возникают при токах более 50 А, и их скорость достигает 50—150 м/с. Поток газа, идущий с кончика электрода, оказывает давление на сварочную ванну, благодаря чему на поверхности расплавленного металла образуется выемка, которая называется **сварочным**

**кратером**. При сжатии дуги скорость газового потока может достигнуть некоторого критического значения, при котором будет удален весь металл из сварочной ванны. Подобные режимы используются при резке металла.

### Перенос металла

**Характер переноса металла** при дуговой сварке зависит: от плотности тока, от длины и атмосферы дуги, от используемой полярности.

**Перенос металла** может быть: крупнокапельным, мелкокапельным, туманообразным.

При плотности тока, характерной для ручной сварки, электродный металл, расплавленный электрической дугой, переходит в виде крупных капель (**рис. 2.3**) в ванну жидкого металла, которая образуется на поверхности свариваемого изделия.

В начальный момент времени на конце электрода образуется слой расплавленного металла (**рис. 2.3, *а***). Затем, по мере накопления, расплавленный металл принимает вид капли (**рис. 2.3, *б***), которая через некоторое время перемыкает дуговой промежуток (**рис. 2.3, *в***). В этот момент происходит короткое замыкание сварочной цепи и резкое возрастание величины сварочного тока. Резкое нарастание тока приводит к возникновению электромагнитных сил, разрывающих каплю у ее основания.

Теперь дуга возникает между концом электрода и каплей. Под давлением паров и газов зоны дуги капля с ускорением вводится в сварочную ванну металла. При этом часть металла в виде брызг выбрасывается из зоны сварки.

**Крупнокапельный перенос** наблюдается преимущественно при сварке на малых токах электродами с тонкой обмазкой.

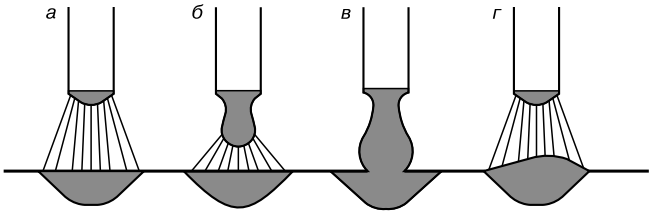



***Рис. 2.3.*** *Крупнокапельный перенос металла электрода на свариваемое изделие: а — образование слоя расплавленного металла; б — расплавленный металл принимает вид капли; в — капля перемыкает дуговой промежуток; г — под давлением паров и газов зоны дуги капля с ускорением вводится в сварочную ванну металла*

При увеличении силы сварочного тока и использовании электродов с толстой обмазкой наблюдается преимущественно **мелкокапельный перенос**, когда отдельные капли металла не перемыкают дуговой промежуток.

## 2.3. Основные характеристики источников питания сварочной дуги

Нередко после сварки с использованием самодельного сварочного источника все пространство вдоль сварочного шва оказывается залепленным каплями металла, удалить которые можно только при помощи зубила и молотка.

**Примечание.**
*Причина этого кроется в неудачно выбранной внешней вольтамперной характеристике сварочного источника.*

**Свойства сварочного источника** определяются его внешней вольтамперной характеристикой.

**Определение.**
***Внешняя вольтамперная характеристика (ВАХ) источника*** *— это функция, характеризующая зависимость выходного напряжения источника от тока.*

Для **снятия внешней характеристики** необходимо:
- последовательно нагружать сварочный источник статической нагрузкой различной величины;
- регистрировать выходные ток и напряжение, соответствующие этой нагрузке.

По полученным результатам строится графическая зависимость. В общем случае нагрузочная характеристика имеет нелинейный характер, зависящий от величины нагрузки источника.

Обычно внешние характеристики источников питания бывают **четырех видов**: крутопадающая; пологопадающая; жесткая; возрастающая.

Кроме этого, различают **статическую** и **динамическую** внешнюю характеристику источника. В установившемся режиме процесс горения дуги определяется статическими характеристиками сварочного

источника и сварочной дуги (**рис. 2.4**).

Как уже говорилось ранее, при ручной дуговой сварке процесс протекает на токах, соответствующих горизонтальному участку вольтамперной характеристики сварочной дуги. Из-за невозможности стабилизации длины дуги **горизонтальный участок ВАХ** дуги смещается относительно своего среднего значения.

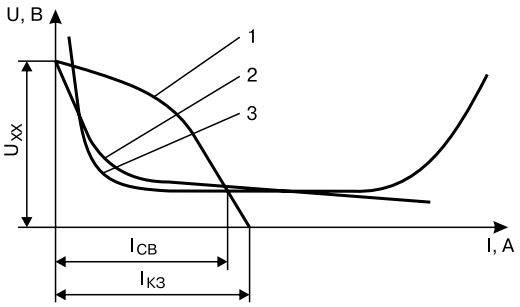



***Рис. 2.4.*** *Семейство вольтамперных характеристик:*
*1 — крутопадающая характеристика источника;*
*2 — вольтамперная характеристика дуги;*
*3 — жесткая характеристика источника*

Для обеспечения высокого качества сварных соединений при этом способе сварки необходимо соблюдать следующие **условия**:

- изменения сварочного тока должны быть минимальными;
- сила тока короткого замыкания не должна превышать удвоенное значение сварочного тока.

В этом случае создаются благоприятные условия переноса металла с электрода в сварочную ванну, а также сварочный ток незначительно меняется при естественном изменении длины дуги.

> **Внимание.**
> *Описанным требованиям в полной мере отвечает лишь* ***крутопадающая*** *характеристика сварочного источника.*

Для регулировки сварочного тока источник должен иметь **задатчик тока**. При этом напряжение дуги зависит:

- от длины дуги;
- от газового состава.

При полуавтоматической сварке в среде защитного газа на больших плотностях тока, соответствующих началу восходящего участка вольтамперной характеристики дуги, для обеспечения ***саморегулирования сварочного процесса*** внешняя характеристика сварочного источника должна быть ***жесткой*** и даже ***возрастающей*** (при сварке тонкой проволокой).

ГЛАВА 3

# СИМУЛЯТОР LTSPICE IV

## 3.1. Моделирование работы источника питания

### Возможности моделирования

Конструирование, изготовление и наладка источников питания имеет свои специфические особенности. **Например**, авария источника и выход из строя его элементов происходит за тысячные и миллионные доли секунды, что практически не дает шанса рассмотреть ее причины и последовательность.

В этом случае многих проблем можно избежать, если предварительно **смоделировать работу схемы источника**. Моделирование позволяет:

- проверять работу элементов источника питания в критических режимах;
- производить замеры, которые обычно проблематичны или даже невозможны на реальном устройстве;
- уточнять и оптимизировать результаты предварительных расчетов, а порой экспериментально подбирать параметры элементов и режимы работы схемы.

Все вышеперечисленные и неперечисленные соображения делают моделирование необходимым этапом конструирования источников питания.

### Программы моделирования электронных схем

В настоящее время любителю и профессионалу доступно большое количество **программ для ПК**, позволяющих производить моделирование работы электронных схем. Зачастую эти программы используют