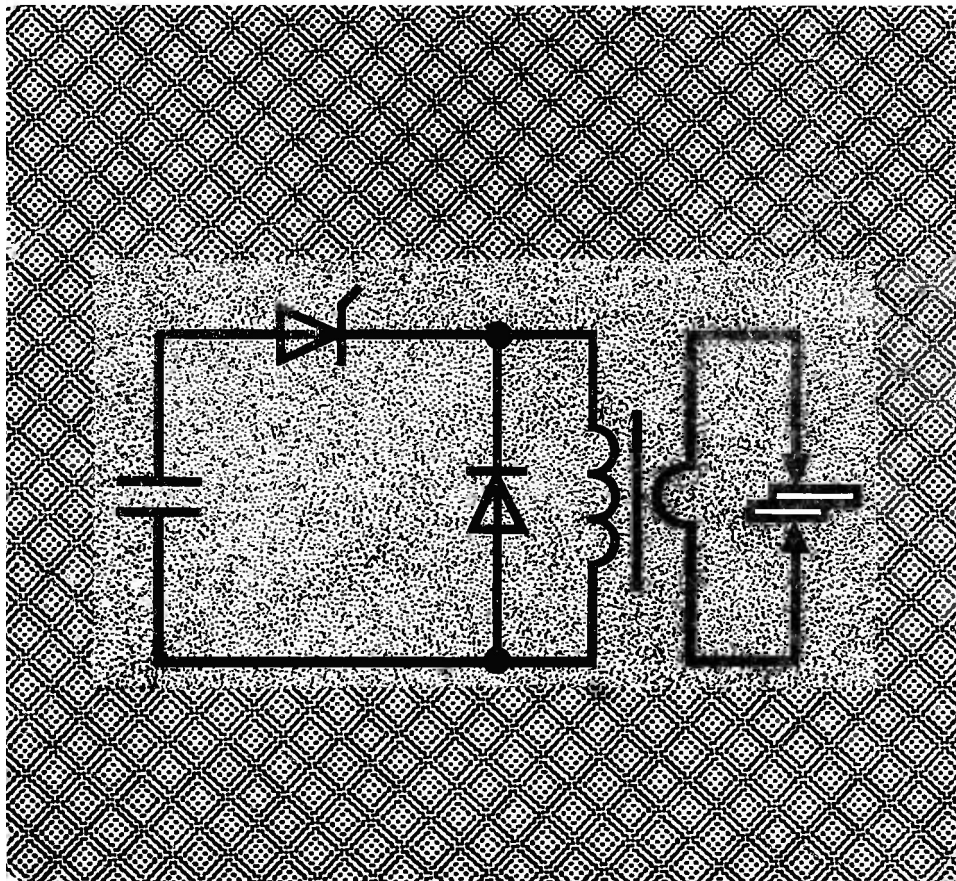




А.Б. БЕЛОВ

КОНДЕНСАТОРНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ



А. В. БЕЛОВ
КОНДЕНСАТОРНЫЕ МАШИНЫ
ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ



Ленинград
 ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
 Ленинградское отделение
 1984

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИНАХ	4
1.1. Основные характеристики и области применения машин	—
1.2. Функциональное устройство и принцип работы машин	9
1.3. Основные типы и электрические схемы машин	18
ГЛАВА ВТОРАЯ. СИЛОВАЯ ЗАРЯДНАЯ ЧАСТЬ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН	29
2.1. Классификация зарядных цепей, содержащих неуправляемые выпрямители и активные токоограничительные элементы	—
2.2. Расчет параметров и элементов зарядных устройств	33
2.3. Зарядные устройства с принудительной коммутацией тока через тиристор	46
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. СИЛОВАЯ РАЗРЯДНАЯ ЧАСТЬ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН	52
3.1. Экспериментальное определение R , L , C -параметров конденсаторной машины	—
3.2. Расчет батареи конденсаторов и сварочного трансформатора по заданному импульсу сварочного тока	58
3.3. Особенности режимов работы тиристорov в разрядной цепи и их выбор	64
3.4. Инвертор в разрядной цепи конденсаторных машин	72
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМИ КОНДЕНСАТОРНЫМИ МАШИНАМИ	79
4.1. Система автоматической стабилизации напряжения на батарее конденсаторов	—
4.2. Унифицированные функциональные блоки	83
ГЛАВА ПЯТАЯ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН	85
5.1. Машины для точечной сварки деталей малых толщин	—
5.2. Машины для точечной сварки деталей больших толщин	92
5.3. Машины и полуавтоматы для герметизации корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем	96
5.4. Машины для шовной сварки	103
Приложение. Особенности сварки корпусов мощных полупроводниковых вентиляей на конденсаторных машинах	107
Список литературы	111

ББК 31.26
Б 43
УДК 621.791.76.037

АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ БЕЛОВ

КОНДЕНСАТОРНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Редактор Л. М. Пархоменко
Художественный редактор Д. Р. Стеванович
Технический редактор Н. А. Минеева
Корректор А. Н. Акимов
ИБ № 98

Сдано в набор 22.03.84. Подписано в печать 13.06.84. М-20878.
Формат 84 × 108^{1/2}. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отг. 6,09.
Уч.-изд. л. 6,76. Тираж 9 000 экз. Заказ 3455. Цена 35 к.

Энергоатомиздат. Ленинградское отделение.
191041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валуевская, 28

Рецензент А. Я. Яшунский

Белов А. Б.

Б 43 Конденсаторные машины для контактной сварки. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. — 112 с., ил. — (Электросварочное оборудование).

35 к. 9000 экз.

Приведены описание и инженерные методы расчета силового электрооборудования машин; рассмотрены особенности режимов работы силовых тиристоров и их выбор; описаны устройства и приведены типы современных отечественных машин, особенности их наладки и эксплуатации.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, наладкой и эксплуатацией сварочных конденсаторных машин. Может быть полезна студентам вузов.

Б 2302030000—121
051(01)—84 98—84

ББК 31.26
6П2.1.08

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конденсаторные машины для контактной сварки находят широкое применение в самых разных отраслях промышленности, например в электронной, авиационной, радио- и приборостроении и других. За последние годы значительно возросла сложность электрооборудования этих машин: на смену реле, электромеханическим контакторам, тиристорам и игнитронам пришли элементы бесконтактной электроавтоматики и полупроводниковые управляемые вентили—тиристоры. Разработаны новые схемы силовой разрядной части, позволяющие получать режим двухимпульсной сварки и регулировать сварочный импульс в процессе сварки, что значительно расширило технологические возможности конденсаторных машин и повысило качество сварки. Успешно решаются задачи повышения производительности и надежности мощных конденсаторных машин, т. е. именно тех показателей, по которым последние уступали до недавнего времени другим машинам для контактной сварки. Именно эти обстоятельства, а также отсутствие книг, содержащих инженерные методы расчета силовых зарядной и разрядной частей, явились основной причиной появления этой книги. Автор надеется, что книга окажется полезной как эксплуатирующим конденсаторные машины специалистам, перед которыми возникают различные задачи по технологии, экспериментальному определению параметров машин, а иногда и по модернизации, так и специалистам — разработчикам конденсаторных машин и студентам, обучающимся по специальности «Оборудование и технология сварочного производства».

Замечания и пожелания по книге просьба посылать по адресу: 191041, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Автор

© Энергоатомиздат, 1984

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ
О КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИНАХ1.1. Основные характеристики
и области применения машин

Машины контактной сварки по принципу электропитания можно разделить на две группы: машины, потребляющие энергию в процессе сварки непосредственно из электросети, и машины, использующие для сварки предварительно накопленную энергию. Применение в машинах второй группы накопителей энергии обусловило основную особенность их работы: операции потребления энергии из электросети и выделения ее при сварке разделены во времени. Указанные особенности устройства и работы определяют энергетические и технологические характеристики машин для контактной сварки запасенной энергией.

Из всех известных способов запасения энергии для сварки: в электрических конденсаторах, магнитопроводах сварочных трансформаторов, электрохимических аккумуляторах, вращающихся маховиках — первый способ оказался наиболее пригодным к технической реализации. В настоящее время конденсаторные машины (КМ) являются практически единственным видом оборудования для контактной сварки запасенной энергией, применяемым в промышленности. Это не исключает, разумеется, освоения в будущем другого известного способа сварки запасенной энергией.

Накопление энергии (заряд батареи конденсаторов) — наиболее длительная операция цикла работы КМ, импульсное выделение энергии в момент сварки (разряд батареи) — наиболее кратковременная операция цикла. Благодаря сравнительно большому времени заряда ($T_3 = 0,5 \dots 1,5$ с) обеспечивается существенное снижение потребляемой КМ мощности и точное дозирование запасаемой энергии. По сравнению с машинами аналогичного назначения КМ имеют установленную мощность, в 5—7 раз меньшую мощности машин низкочастотных и постоянного тока. Например, при сварке легких сплавов толщиной (1,5+1,5) мм машины переменного тока потребля-

ют мощность около 300 кВ·А, КМ — не более 20 кВ·А. При этом КМ практически не снижают коэффициента мощности сети, так как являются для нее преимущественно активно-емкостной нагрузкой. В случае необходимости установленная мощность данной КМ может быть уменьшена путем увеличения T_3 за счет снижения производительности машины. Энергетическое преимущество КМ наиболее существенно, если они могут быть использованы взамен контактных машин с непосредственным питанием от электросети, мощность которых достигает 1000 кВ·А и более. Такая замена особенно выгодна в тех случаях, когда для подключения весьма мощных машин требуется увеличение установленной мощности, установка трансформаторной подстанции в цехе, увеличение мощности компенсирующих устройств и т. д.

Точное дозирование энергии для сварки осуществляется в КМ благодаря стабилизации рабочего (заданного) напряжения на накопительных конденсаторах. Ввиду того что заряд конденсаторов происходит в течение длительного времени (за 20—70 периодов напряжения электросети), удается стабилизировать напряжение батареи конденсаторов U_c с большей точностью, чем напряжение в машинах с непосредственным питанием от электросети. В современных КМ системы управления поддерживают U_c в пределах 0,99—1,01 заданного значения при колебаниях напряжения электросети в пределах 0,85—1,10 номинального значения. В результате обеспечивается высокая стабильность сварочного тока КМ. Последняя несколько ниже стабильности U_c , но в большинстве случаев отклонение тока не превышает 2% среднего значения при данной настройке КМ. В итоге при сварке на КМ обеспечивается высокая стабильность качества сварных соединений.

Ввиду того что разряд конденсаторов происходит в течение сравнительно короткого времени (время разряда меньше 0,1 с в самых мощных КМ), сварка на КМ осуществляется в «жестких» режимах по сравнению с контактными машинами других видов. Например, при точечной сварке легких сплавов толщиной (1,5+1,5) мм время сварки на КМ равно 0,03 с, на машинах низкочастотных и постоянного тока — 0,06 с, на машинах переменного тока — 0,14 с; при сварке нержавеющей стали той же толщины время сварки на КМ равно 0,03 с, на остальных машинах — 0,18—0,24 с. Импульс сварочного тока КМ не имеет пульсаций и разрывов, что обуславливает плавное изменение плотности тока — одного из важнейших параметров процесса сварки. Это определяет плавное изменение

температурного поля и, следовательно, нагревание и расплавление свариваемых металлов. Монотонное изменение основных параметров процесса обеспечивает возможность сварки данных деталей без выплесков в наиболее «жестком» режиме, при котором случайные отклонения других параметров процесса в меньшей мере влияют на результаты сварки.

Как параметр технологического процесса сварки импульс вторичного (сварочного) тока i_2 может быть вполне однозначно определен двумя его характеристиками: амплитудным значением I_{2a} и временем нарастания от нуля

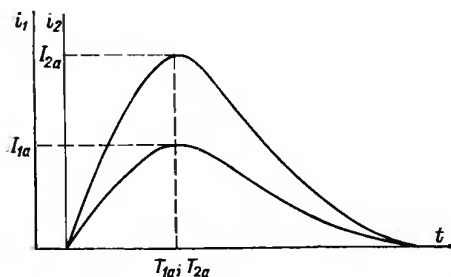


Рис. 1.1. Первичный и вторичный токи сварочного трансформатора ($I_{2a} = nI_{1a}$)

до амплитуды T_{2a} (рис. 1.1). Экспериментально установлено, что формирование сварного соединения заданных размеров при сварке на КМ завершается вскоре после достижения током значения I_{2a} , т. е. происходит в течение промежутка времени, практически равного T_{2a} . Поэтому параметр T_{2a} допустимо (и удобно, учитывая трудность определения фактического времени сварки) считать технологическим параметром процесса — временем сварки на КМ.

Иногда в качестве времени сварки указывают длительность импульса $T_{2н}$, что не совсем правильно, так как существенную долю последней составляет спадающая часть импульса, имеющая второстепенное значение для тепловыделения в процессе сварки. В дальнейшем, при описании импульса i_2 , будем указывать значение T_{2a} . При необходимости $T_{2н}$ может быть определено по известному T_{2a} , так как соотношение их для всех импульсов тока данной КМ является постоянным; для большинства КМ $T_{2н} = (1,5 \dots 2,5) T_{2a}$. Импульс первичного (разрядного) тока i_1 также определяется амплитудным значением тока I_{1a} и

временем нарастания тока T_{1a} (рис. 1.1). В обычном случае (намагничивающий ток $I_{\mu} \leq 0,05 I_{1a}$ в течение периода T_{1a}) амплитудные значения токов связаны отношением $I_{2a} = nI_{1a}$, где n — коэффициент трансформации сварочного трансформатора. При этом практически $T_{1a} = T_{2a}$, $T_{1н} = T_{2н}$. В тех случаях, когда импульс i_1 имеет пологий спад, будем считать длительностью $T_{1н}$ время от начала импульса до момента спада тока до значения, равного $0,1 I_{1a}$.

Кроме рассмотренных выше особенностей КМ, следует отметить повышенную надежность, плавность и удобство регулирования сварочного тока. Надежность КМ обусловлена тем, что сбой в работе тиристоров не влияет на результаты сварки: неисправности зарядного устройства блокируются благодаря контролю заданного значения напряжения на конденсаторах U_c ; при пропусках включения разрядных тиристоров сварка вообще не происходит, при пробоях этих тиристоров разряд батареи конденсаторов нормально продолжается до конца. Плавность и удобство регулирования сварочного тока обеспечены за счет плавного изменения U_c и визуального контроля его по вольтметру.

Особенности КМ обусловили области их основного применения: а) сварка деталей малых толщин и диаметров; КМ являются одним из основных видов оборудования контактной сварки в электронике и приборостроении; б) сварка изделий, не допускающих коробления вследствие нагрева или содержащих элементы, температура нагрева которых ограничена, например сварка корпусов интегральных схем и полупроводниковых приборов, сварка металлических листов с декоративным покрытием из пластика и т. п.; в) сварка материалов с высокой температуро- и электропроводностью, например сварка легких сплавов на основе алюминия и магния и т. п.; г) сварка материалов с различными физико-химическими свойствами; д) сварка деталей неравной толщины, причем соотношение толщин при сварке на КМ может быть наибольшим по сравнению с другими способами контактной сварки. При прочих равных условиях применение КМ оказывается предпочтительным в большинстве тех случаев, когда требуется высокая стабильность качества сварных соединений (например, при изготовлении изделий ответственного назначения), а также при перегруженной или маломощной электросети.

Одна из особенностей КМ — «жесткость» импульса сварочного тока — в некоторых случаях сварки обращается в недостаток, ограничивающий возможности машин. На-

пример, по этой причине затруднена сварка на существующих КМ сплавов типа АМгб толщиной 2,0 мм, в то время как на них же сварка легких сплавов других типов осуществляется с наилучшими результатами. Толщина деталей из легких сплавов, свариваемых на существующих КМ, не превышает 3,0 мм. Создание КМ обычного типа для сварки деталей большей толщины нецелесообразно, так как при дальнейшем увеличении длительности импульса тока относительно резко возрастают масса и габариты батареи конденсаторов и сварочного трансформатора, а также стоимость КМ.

В других случаях недостатком КМ является ограниченная возможность управления сварочным током в процессе сварки. В результате при достаточной длительности импульса тока иногда трудно получить форму импульса, технологически наиболее оптимальную при сварке данных деталей. Попытки преодолеть этот недостаток КМ путем комбинирования разрядов нескольких батарей конденсаторов, сочетания тока разряда батареи с током иного рода и т. д. дают положительные результаты лишь в частных случаях. В последние годы разработаны КМ с преобразованием разрядного тока конденсаторов в переменный ток на первичной обмотке сварочного трансформатора, причем частота первичного тока составляет от десятков до сотен, иногда тысяч герц. Регулируя частоту переменного тока и число импульсов в пачке, воздействуют на форму импульса и на процесс тепловыделения во время сварки. Перспективными областями для использования КМ этого типа являются: а) микросварка, где ток промышленной частоты является лимитирующим фактором для получения высококачественных соединений; б) сварка больших толщин и сечений, в том числе рельефная сварка большого числа компактных рельефов или сварка рельефов развитого сечения, когда снижение потребляемой из электросети мощности становится одним из важнейших факторов.

Учитывая тенденции в разработке КМ, можно предположить, что в дальнейшем будут созданы новые типы машин, большинство которых составят мощные специализированные машины. Наряду с КМ обычного типа (с нерегулируемым в процессе сварки током) будут применяться КМ с преобразованием разрядного тока в переменный ток повышенной частоты и с модулированным импульсом тока, а также КМ с ограниченным управлением, получаемым за счет наложения разрядных токов двух и более батарей конденсаторов. Область применения КМ должна расширяться как за счет создания специализированных машин

для сварки новых изделий, материалы и толщины которых находятся в диапазоне уже освоенных, так и за счет расширения диапазона толщин деталей и свариваемых сечений. Значительный резерв улучшения мощных КМ заложен в повышении производительности машин, ограниченной, как правило, допустимым темпом циклирования электролитических конденсаторов в режиме заряд—разряд. Предполагается разработать новые конденсаторы с увеличением среднего темпа циклирования до 40 циклов в минуту, а также новые силовые схемы КМ, ограничивающие разряд конденсаторов по напряжению на уровне 20—40% номинального, что позволит повысить производительность машин приблизительно вдвое. Эффективным путем повышения производительности КМ в два и более раза является также применение неполярных, например металлобумажных, конденсаторов. Увеличение рабочего напряжения до 1000 В, более удобная, если учесть прямоугольный корпус, компоновка конденсаторов в батарее, отсутствие вентиляционных систем охлаждения позволяет при этом сохранить массу и габариты конденсаторной батареи на уровне параметров батарей с электролитическими конденсаторами.

1.2. Функциональное устройство и принцип работы машин

В составе каждой КМ, как и любой другой машины контактной сварки, выделяют три основные части: силовую электрическую, механическую и аппаратуру управления.

Механические части КМ — корпуса, приводы сжатия электродов, пневматические устройства, системы охлаждения и т. д. — не отличаются принципиально от таких же частей контактных машин других видов. Следует лишь отметить, что в КМ применяются, как правило, приводы сжатия электродов с высокими динамическими качествами, обеспечивающие высокую подвижность электрода, что обусловлено кратковременностью процесса формирования сварного соединения при сварке на КМ.

Аппаратура управления КМ отличается от аппаратуры других контактных машин наличием системы управления зарядным выпрямителем, обеспечивающей регулирование, стабилизацию и контроль рабочего напряжения на конденсаторах. Остальные цепи управления КМ аналогичны цепям других контактных машин, причем регуляторы цикла в обычных КМ относятся к простейшим, так как не содер-

жат цепей управления сварочным током. В КМ задается лишь время операции «сварка», а значение, длительность и форма импульса сварочного тока определяются настройкой силовой электрической части машины. Исключением являются КМ с преобразованием разрядного тока, в которых применяются системы управления током. КМ такого рода появились в последние годы и представлены пока только опытными образцами

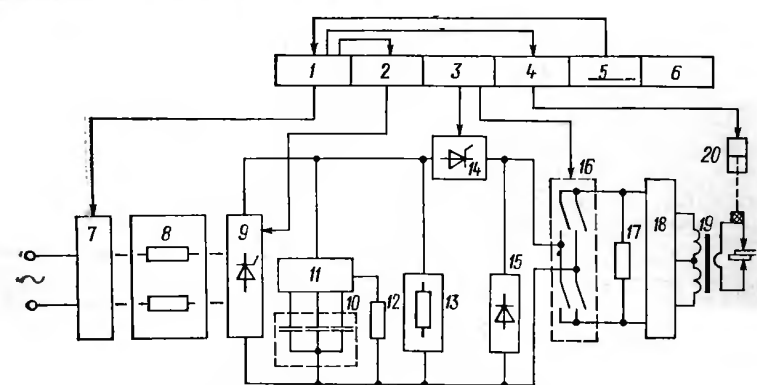


Рис. 1.2. Структурная схема мощной КМ

Силовые электрические части КМ отличаются большим разнообразием как схемных, так и конструктивных решений. Однако большинство узлов, входящих в состав каждой из них, являются общими. Рассмотрим для примера структурную схему мощной КМ с батареей электролитических конденсаторов (рис. 1.2). Одним из основных элементов силовой электрической части КМ является батарея конденсаторов 10. Остальные элементы силовой части образуют зарядную и разрядную цепи КМ, предназначенные соответственно для передачи энергии из электросети в батарею конденсаторов и от нее — в зону сварки. Батарея конденсаторов 10 состоит, как правило, из нескольких секций различной емкости, что позволяет ступенями регулировать емкость батареи. В зависимости от требуемой емкости число и сочетание включенных секций изменяют переключателем ступеней емкости 11. При этом отключенные секции шунтируются резистором 12 для предотвращения возникновения напряжения на отключенных после разряда электролитических конденсаторах. Батареи конденсаторов сравнительно небольших размеров размещаются в корпусах станций управления или машин, батареи

мощных КМ — в отдельных конденсаторных шкафах. Конденсаторы батареи изолированы от корпуса шкафа в случае непосредственного подключения зарядного выпрямителя к электросети и не изолированы от корпуса, если в КМ имеется зарядный трансформатор.

В состав зарядной цепи КМ входят: зарядный выпрямитель 9, токоограничительные резисторы 8 и включающие устройства 7. Во многих КМ применяются управляемые зарядные выпрямители, собранные по однофазной мостовой схеме с двумя диодами и двумя управляемыми вентилями. В некоторых КМ малой мощности мостовой выпрямитель собран полностью на диодах и управление зарядом конденсаторов осуществляется с помощью управляемого вентиля, включенного в цепь выпрямленного тока. В наиболее мощных КМ используются схемы трехфазного выпрямления тока, чаще всего однополупериодного, с тремя управляемыми вентилями. При относительно низких рабочих напряжениях, как в КМ с электролитическими конденсаторами на номинальное напряжение 400 В, зарядные выпрямители могут подключаться непосредственно к электросети напряжением 380 В. При повышенных напряжениях на батареях (500 В и более) и сетевых напряжениях менее 380 В выпрямители подключаются к сети через повышающие зарядные трансформаторы. Применение последних необходимо также в тех случаях, когда машина рассчитана на подключение к электросетям с различными напряжениями или требуется повысить выпрямленное напряжение для ускорения заряда конденсаторов с целью увеличения темпа работы КМ.

Ограничивающие зарядный ток резисторы 8 включаются в каждую фазу со стороны переменного тока выпрямителя или в цепь выпрямленного тока. Первый вариант является более предпочтительным, так как здесь резисторы служат также для ограничения токов короткого замыкания в случае пробоя фазы на корпус, или замыкания фаз между собой (например, в случае пробоя вентиля зарядного выпрямителя). Используется также вариант включения резисторов с обеих сторон выпрямителя 9, например в КМ с шунтирующей цепью из последовательно соединенных диода и резистора, включенных параллельно первичной обмотке сварочного трансформатора. В этом случае на конденсаторах после их разряда возникает обратное напряжение, которое является прямым для зарядного выпрямителя. При очередном включении последнего через него происходит разряд конденсаторов. Резистор в цепи выпрямленного тока одновременно служит для ограниче-

ния этого разрядного тока и зарядного тока конденсаторов.

Применение резисторов в качестве токоограничительных элементов ухудшает характеристики зарядного устройства по сравнению с устройством, в котором используются реактивные сопротивления: в первом случае более низкий КПД заряда, выше бросок тока в момент включения выпрямителя и т. д. Однако при этом упрощается конструкция зарядного устройства и улучшаются условия фазового управления зарядным током, применяемого в современных системах автоматической стабилизации напряжения на конденсаторах.

Включающее устройство 7 содержит автоматический выключатель и электромагнитный пускатель, рассчитанные на мощность, потребляемую из электросети при заряде батареи конденсаторов. Первый служит для отключения КМ от сети при увеличении потребляемого тока выше нормы и при срабатывании некоторых блокировок. Второй позволяет отключать от сети только электрическую часть КМ, не отключая аппаратуру управления.

В состав разрядной цепи КМ входят: сварочный трансформатор 19 с переключателем ступеней первичной обмотки 18, разрядный управляемый вентиль 14, шунтирующий вентиль 15, переключатель полярности тока 16.

Сварочные трансформаторы КМ имеют шихтованные магнитопроводы броневого типа и дисковые первичную и вторичную обмотки (редко — цилиндрические). Секционированная первичная обмотка выполнена из изолированного медного провода прямоугольного сечения и разделена на отдельные катушки — диски, чередующиеся с монолитными дисками вторичной обмотки. Последние вырезаны чаще всего из толстых листов электротехнической меди и соединены параллельно контактными колодками, образуя один виток. Вторичная обмотка охлаждается проточной водой, протекающей по клапанам внутри колодок и по трубкам, припаянным к дискам по внешним контурам. Магнитопровод трансформатора набран вперехлест из прямоугольных стальных пластин, и пакет магнитопровода плотно зажат между двумя массивными рамами, стянутыми проходящими через них и пакет шпильками. Пакет обмоток плотно зажат между изоляционными планками с помощью болтов, ввинчиваемых в полки рам.

Сварочные трансформаторы КМ, не отличаясь от трансформаторов других машин контактной сварки по принципу устройства, имеют ряд конструктивных особенностей, обусловленных режимами их работы в КМ. Отно-

сительно малые продолжительность включения тока и число циклов перемагничивания магнитопровода в КМ позволяют пренебречь потерями на вихревые токи и гистерезис и набирать магнитопровод из листов малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм (вместо электротехнической стали толщиной не более 0,5 мм).

Возможность уменьшения сравнительно дорогостоящей батареи конденсаторов за счет снижения активного сопротивления машины предопределяет увеличение, как правило, сечений обмоток трансформатора (и токоподводов сварочного контура) по сравнению с расчетными, выбранными по условиям допустимого нагрева. Наконец, особенностью трансформаторов современных КМ можно считать также малое число ступеней включения первичных обмоток: в специализированных КМ и машинах общего назначения последних выпусков оно, как правило, равно двум (последовательное и параллельное соединение половин первичной обмотки). Это обусловлено тем, что в большинстве случаев необходимое регулирование сварочного тока в КМ вполне обеспечивается изменением емкости и напряжения батареи конденсаторов при двух коэффициентах трансформации сварочного трансформатора.

В КМ применяются сварочные трансформаторы без зазора и с воздушным зазором в магнитопроводе. Трансформатор первого типа используется в КМ с двухполярными импульсами тока, в которых изменение направления токов в обмотках трансформатора и, следовательно, перемагничивание магнитопровода происходят в каждом цикле. Трансформаторы второго типа устанавливаются в КМ с однополярными импульсами тока. Воздушный зазор в магнитопроводе предотвращает магнитное насыщение последнего при отсутствии перемагничивания. Вследствие того что в этом случае значение допустимой индукции меньше, сечение магнитопровода на 30—40% больше сечения магнитопровода без зазора (при прочих равных условиях). При этом возрастает также расход медных материалов, так как увеличивается средняя длина витков обмоток. В результате размеры, масса и стоимость трансформатора второго типа больше, чем первого. Наконец, в КМ с трансформатором второго типа возрастают потери запасаемой энергии вследствие относительного увеличения намагничивающей составляющей первичного (разрядного) тока, что требует запаса сравнительно большего количества энергии. Однако применение трансформаторов с зазорами в магнитопроводах оправдано в одном случае упрощением схемы КМ, в другом — необходимостью обеспече-

ния постоянного направления импульсов сварочного тока при сварке некоторых пар разнородных материалов.

В качестве переключателей ступеней первичных обмоток 18 в КМ малой мощности применяются пакетные переключатели, иногда — штепсельные, в более мощных КМ — чаще всего пластинчатые переключатели. Переключение последних производится с помощью инструмента и требует большего времени, однако они выгодно отличаются простой конструкцией и высокой надежностью по сравнению с переключателями других видов. Переключатель полярности тока 16 предназначен для изменения направления токов в обмотках сварочного трансформатора 19. В КМ с двухполярными импульсами тока, в которых осуществляется в каждом цикле перемагничивание магнитопровода трансформатора 19, переключатель 16 состоит из двух электромеханических контакторов, работающих по очереди. В КМ с однополярными импульсами тока в качестве переключателя 16 применяется простейший механический переключатель пластинчатого типа. Он используется для изменения полярности импульсов сварочного тока на противоположную в тех случаях, когда эта полярность имеет значение при сварке и не может быть изменена за счет изменения положения свариваемых деталей относительно электродов. При данной установке переключателя полярность импульсов сварочного тока остается неизменной. В КМ с двухполярными импульсами тока, содержащей разрядный управляемый вентиль 14, переключатель 16 используется только для изменения направления токов, переключение же контакторов происходит в паузу между циклами. При отсутствии в КМ вентиля 14 контакторы переключателя 16 служат также для замыкания разрядной цепи батареи конденсаторов. При этом очередной контактор включается только на время разряда батареи, отключаясь сразу после окончания операции «сварка». В этом случае первичную обмотку трансформатора 19 шунтируют резистором 17, чтобы предотвратить разрыв цепи обмотки после выключения контактора.

Вентиль 15 служит для шунтирования полуволны обратного напряжения, возникающей вследствие колебательного характера процесса разряда батареи конденсаторов в КМ. Шунтирование предотвращает перезаряд конденсаторов, который нежелателен по двум причинам. Во-первых, обратное напряжение может достигать значений, недопустимых для электролитических конденсаторов, применяемых в мощных КМ. Во-вторых, заряд конденсаторов от отрицательного напряжения приводит к увеличению

зарядного тока и потребляемой мощности, к снижению КПД зарядного устройства. В результате возрастают потери энергии, увеличиваются стоимость и размеры элементов зарядного устройства по сравнению с зарядом от нулевого и тем более от положительного напряжения. Шунтирующий вентиль 15, предотвращая перезаряд конденсаторов, обеспечивает также замыкание цепи первичной обмотки сварочного трансформатора после отключения разрядного вентиля. При этом происходит замедление спада первичного и вторичного тока и может возникать искрение либо между контактами отключающихся под током контакторов полярности, если отключение происходит до замыкания электродов, либо между размыкающимися электродами при замкнутых контактах контакторов полярности. Первое сокращает срок службы контакторов, второе может вызвать брак при сварке и повреждение электродов. С целью сокращения спада первичного тока до нуля последовательно с шунтирующим вентилем включают резистор. Сопротивление резистора выбирают таким образом, чтобы возникающий при этом перезаряд конденсаторов был ограниченным и обратное напряжение на них не превышало допустимого значения (100 В для электролитических конденсаторов К50И-1, применяемых в мощных КМ).

При отключении зарядного выпрямителя 9 от электросети, в том числе в результате срабатывания блокировок, батарея конденсаторов 10 разряжается на резистор 13. Цепь последнего замыкается в этот момент размыкающими контактами пускателя, отключающего зарядный выпрямитель.

По функциональному назначению аппаратуру управления КМ можно разделить на следующие системы и устройства: пусковые и вспомогательные цепи 1, систему регулирования и стабилизации напряжения на конденсаторах 2, цепи управления разрядным вентилем и переключателем полярности тока 3, регулятор цикла 4, цепи контроля, защиты и блокировки 5. Питание цепей управления осуществляется от источников питания 6 (рис. 1.2). Цепи 1 служат для задания вида цикла работы (наладка, сварка), включения устройств 7, первоначального запуска системы 2 (или ручного управления ею), запуска регулятора 4. Система 2 предназначена для управления зарядным выпрямителем 9, обеспечивает регулирование напряжения на конденсаторах батареи 10 и автоматическое поддержание заданного напряжения с необходимой точностью до момента разряда. Цепи 3 обеспечивают включение разряд-

ного вентиля 14 и очередность срабатывания контакторов полярности 16, предотвращая одновременное включение последних. Регулятор 4 управляет работой КМ по циклу, определяя последовательность и длительность включения ее устройств, в том числе привода сжатия электродов 20. Цепи 5 контролируют взаимодействие важнейших устройств КМ и состояние элементов защиты, обеспечивая нормальную работу машины по циклу и безопасность ее обслуживания, в частности контролируют окончание заряда конденсаторов до заданного напряжения, зажатие свариваемых деталей между электродами, состояние блокировок дверей и т. д.

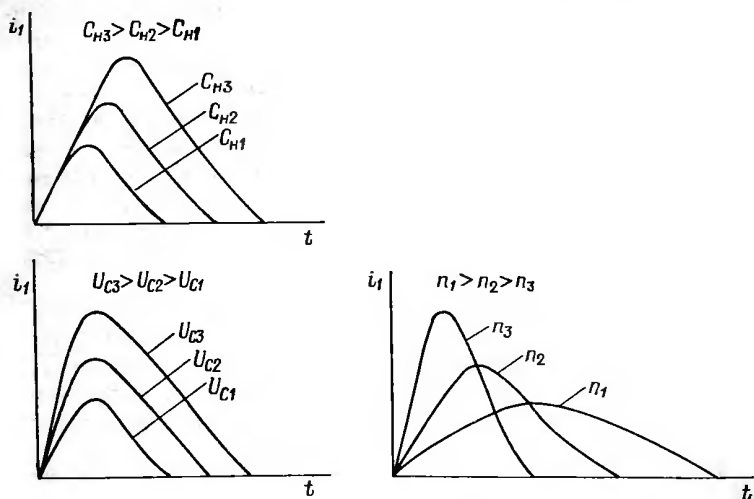


Рис. 1.3. Ток i_1 при различных C_n , U_c , n

Цикл работы КМ отличается от циклов других контактных машин в основном наличием операций заряда и разряда конденсаторов. В большинстве КМ заряд конденсаторов осуществляется в течение времени операций «пауза» и «сжатие», в некоторых КМ — в промежутке времени между операциями «сжатие» и «сварка» (см. § 1.3). Разряд конденсаторов во всех КМ происходит в течение времени «сварка». Однако в отличие от контактных машин, потребляющих мощность в процессе сварки, длительность операции «сварка» не определяет время сварки и всегда больше длительности импульса первичного (разрядного) тока. Длительность последнего, как и значение тока, зави-

сит только от установленных значений параметров разрядной цепи КМ (при прочих постоянных условиях).

При увеличении емкости накопительной батареи конденсаторов C_n (рис. 1.3) увеличиваются максимальное значение I_{1a} , время нарастания T_{1a} и длительность импульса $T_{1н}$ первичного тока (здесь и далее при изменении одного из параметров разрядной цепи два других остаются неизменными). При увеличении напряжения U_c на батарее конденсаторов пропорционально возрастает I_{1a} и практически не изменяются T_{1a} и $T_{1н}$. При увеличении коэффициента трансформации сварочного трансформатора n уменьшается I_{1a} и увеличиваются T_{1a} и $T_{1н}$. Импульс вторичного (сварочного) тока подобен по форме импульсу первичного тока, имеет такое же время нарастания, и его значение изменяется пропорционально первичному току. Подобие импульсов тока нарушается при больших значениях индукции B в магнитопроводе сварочного трансформатора, близких к максимально допустимому значению B_m и превышающих его, т. е. при состоянии магнитопровода, близком к насыщению.

Нормальная работа КМ по циклу обеспечивается с помощью различных блокировок. В КМ с автоматической стабилизацией U_c контролируется окончание заряда батареи и разряд батареи (сварка) возможен только при заданном уровне U_c . Если заряд своевременно не закончился, то начало операции «сварка» автоматически задерживается до момента достижения заданного U_c . Контроль максимального уровня U_c позволяет отключить зарядное устройство и разрядить батарею на шунтирующий резистор 13 (см. рис. 1.2) при неисправностях в цепях управления, приводящих к потере управляемости зарядного устройства. Контроль работы контакторов переключателя 16 в КМ с двухполярными импульсами тока позволяет избежать одновременного срабатывания контакторов и работы машины по циклу при включении только одного контактора и, таким образом, предотвращает короткое замыкание батареи конденсаторов и насыщение магнитопровода сварочного трансформатора. В большинстве КМ блокируется включение зарядного устройства во время разряда батареи. Во многих КМ осуществляется контроль сжатия электродов, что делает невозможным, в частности, включение разряда батареи при разомкнутой вторичной обмотке сварочного трансформатора.

1.3. Основные типы и электрические схемы машин

В зависимости от типа рабочих конденсаторов, в значительной мере определяющих характеристики машины, КМ можно разделить на две группы. К первой относятся машины с батареями бумажных конденсаторов на рабочее напряжение 1000—6000 В и общей емкостью не более 10 000 мкФ. Для этих КМ характерны «жесткие» импульсы сварочного тока: длительность импульса не более 0,01 с, время нарастания тока порядка 0,001 с. При сварке такими импульсами тока высока вероятность образования выплесков и усадочных дефектов в сварочных соединениях. Во избежание выплесков необходима точная подгонка и хорошая подготовка свариваемых деталей. Высокое напряжение на конденсаторах требует дополнительных затрат при изготовлении машин и представляет повышенную опасность при их эксплуатации. Требования к изоляции и обеспечению безопасности обслуживания несколько снижаются для части машин первой группы, преимущественно КМ малой мощности, рабочее напряжение которых не превышает 1000 В.

Ко второй группе относятся КМ с батареями электролитических импульсных конденсаторов на рабочее напряжение 300—450 В и общей емкостью до 500 000 мкФ и более. Эти машины отличаются более широкими технологическими возможностями: сварка на них осуществляется как «мягкими» импульсами тока: длительностью до 0,3 с и временем нарастания тока до 0,08 с, так и относительно «жесткими» импульсами. По условиям безопасности эксплуатации КМ второй группы не отличаются от машин контактной сварки других видов, так как рабочее напряжение на конденсаторах не превышает максимального значения напряжения электросети 380 В. Недостатками КМ второй группы по сравнению с КМ первой группы являются меньший темп работы (30—40 сварок в минуту вместо 60—100) и большие по размерам и массе батареи конденсаторов.

Машины первой группы — это в основном машины ранних выпусков. В последние годы КМ с «жесткими» импульсами называют машинами «ультраимпульсной» сварки. Создание КМ второй группы стало возможным после появления в середине 50-х годов новых электролитических конденсаторов с высокой удельной энергоемкостью, рассчитанных на длительную работу в импульсных режимах

при среднечасовом темпе до 30 сварок в минуту (кратковременно — до 60).

Схемы электрических устройств КМ отличаются чрезвычайным многообразием, что объясняется как различным назначением машин, так и различным подходом к решению двух основных задач: обеспечения высокой стабильности напряжения на конденсаторах и возможности регулирования тока в процессе сварки.

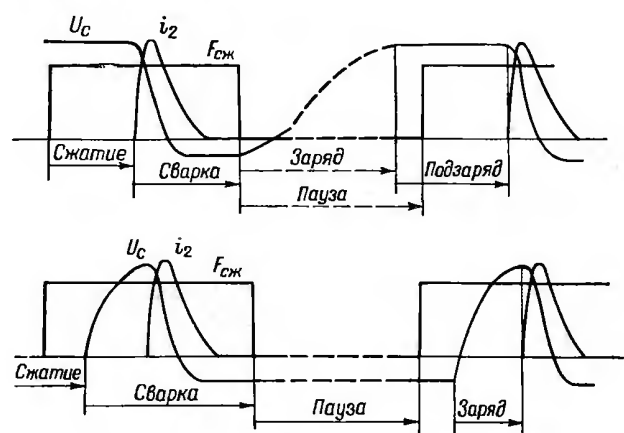


Рис. 1.4. Цикл работы КМ с подзарядом конденсаторов и с релаксационным сбросом напряжения на конденсаторах

По способу осуществления заряда рабочих конденсаторов различают КМ с автоматическим поддержанием напряжения на конденсаторах на заданном уровне (с подзарядом конденсаторов) и КМ с релаксационным сбросом напряжения в момент достижения им заданного уровня без подзаряда конденсаторов. Если в циклах работы КМ выделить только основные операции, то машины первого типа имеют цикл заряд — подзаряд — разряд, машины второго типа — заряд — разряд.

В КМ с подзарядом конденсаторов заряд последних начинается сразу после окончания операции «сварка» (рис. 1.4). На рисунке $F_{сж}$ — усилие сжатия электродов. В зависимости от установленных значений C_n , U_c и времени «пауза» заряд батареи может закончиться в любой момент времени до начала разряда конденсаторов. Независимо от длительности промежутка времени между окончанием заряда и началом разряда заданный уровень U_c

автоматически поддерживается благодаря периодическому подзаряду конденсаторов. При длительности цикла, соответствующей номинальному темпу работы машины, время заряда батареи максимальной емкости C_n до максимального уровня U_c примерно равно суммарному времени операций «пауза» и «сжатие». Таким образом, в КМ с подзарядом конденсаторов заряд осуществляется в течение большей части времени цикла (продолжительность заряда равна примерно 80% продолжительности цикла при номинальном темпе работы машины), что позволяет существенно снизить потребляемую из сети мощность. Последнее особенно важно при запасании больших количеств энергии, и поэтому практически все мощные КМ являются машинами с подзарядом конденсаторов.

С целью выравнивания (усреднения) в процессе заряда потребляемой мощности, а также с целью стабилизации напряжения на конденсаторах в КМ с подзарядом конденсаторов применяют различные схемы регулирования зарядного тока за счет изменения ограничивающего (балластного) сопротивления в зарядной цепи R_c , выпрямленного напряжения U_b и угла включения зарядных вентилях α (фазовое регулирование тока). Фазовое регулирование наиболее удобно и поэтому нашло широкое применение в современных КМ.

В машинах без подзаряда конденсаторов заряд батареи начинается после окончания операции «сжатие» (рис. 1.4). Это обусловлено тем, что к моменту окончания заряда конденсаторов свариваемое изделие должно находиться под заданным давлением, так как разряд конденсаторов (сварка изделия) происходит автоматически в момент достижения заданного уровня U_c . Таким образом, операция заряда конденсаторов не совмещена во времени с другими операциями цикла машины, что при прочих равных условиях (одинаковое время операций, равные потребляемые мощности и т. д.) увеличивает длительность цикла и снижает производительность КМ без подзаряда по сравнению с КМ с подзарядом конденсаторов. При одинаковой производительности КМ без подзаряда потребляет большую мощность. Однако это обстоятельство не является существенным, если значение мощности не превышает нескольких киловольт-ампер. Поэтому система релаксационного сброса U_c находит применение в мало-мощных КМ с запасаемой энергией до 1000 Дж, так как схема управления в этом случае является более простой и надежной.

Релаксационный сброс U_c может осуществляться как без отключения зарядной цепи в момент разряда конденсаторов, так и с отключением ее. В последнем случае производится шунтирование неуправляемого зарядного выпрямителя, в результате чего происходит гашение зарядного тиристора в цепи выпрямительного тока. Это способствует стабилизации U_c при наименьших значениях C_n и U_c , когда заряд конденсаторов осуществляется в течение нескольких полупериодов напряжения сети.

В зависимости от того, изменяется направление токов в обмотках сварочного трансформатора в каждом цикле или остается неизменным, различают КМ с двухполярными и однополярными импульсами тока. Как указывалось выше (см. § 1.2), в большинстве КМ с однополярными импульсами тока применяются сварочные трансформаторы, магнитопроводы которых имеют воздушные зазоры. Однако существуют КМ этого типа, трансформаторы которых не отличаются от трансформаторов такой же мощности, используемых в КМ с двухполярными импульсами. Магнитное насыщение предотвращается в этом случае перемагничиванием магнитопроводов за счет пропуска через первичные обмотки трансформаторов импульсов тока обратного направления. Последние получают от специальных или зарядных выпрямителей, подключая их к первичным обмоткам после прохождения разрядных импульсов тока. Иногда в качестве перемагничивающего тока используется зарядный ток конденсаторов. Применение КМ с однополярными импульсами тока в одних случаях обусловлено относительной простотой их схемы, в других — необходимостью учитывать эффект Пельтье, проявляющийся при сварке некоторых пар металлов и сплавов с различными физико-химическими свойствами.

В КМ с двухполярными импульсами тока применяются различные схемы силовых разрядных цепей. Так, например, в шовных машинах и машинах для точечной микросварки двухполярные импульсы тока получают с помощью последовательных инверторов в разрядных цепях КМ. Схема одной из силовых разрядных цепей такого рода приведена на рис. 1.5, а. Импульсы одной полярности (1, 3, 5) формируются в моменты включения тиристора $VS1$, подключающего коммутирующую батарею конденсаторов C_k к предварительно заряженной накопительной батарее C_n , импульсы другой полярности (2, 4) — в моменты включения тиристора $VS2$. Первые являются импульсами зарядного тока, вторые — импульсами разрядного тока батареи C_k . В качестве источника энергии применяется накопитель-

ная батарея конденсаторов C_n , емкость которой примерно в 10 раз превышает емкость батареи конденсаторов C_k . Эта схема и различные ее варианты реализованы в отечественных КМ разных типов.

Известны схемы КМ (рис. 1.5, б), в разрядных цепях которых применены инверторы мостового типа с коммутирующей (рабочей) батареей конденсаторов в диагонали моста. В этих КМ могут быть получены как двухполярные,

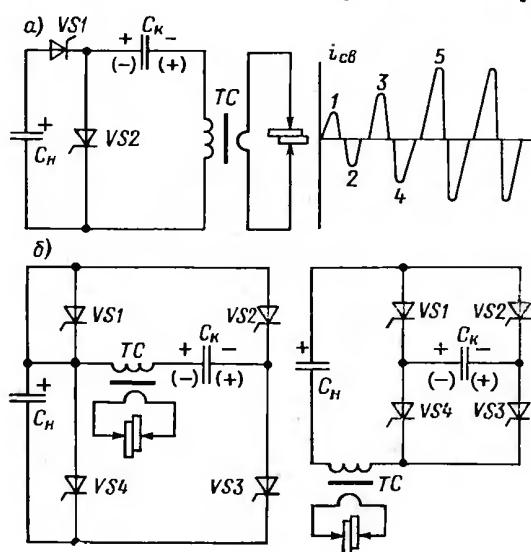


Рис. 1.5. Схемы КМ на базе последовательного инвертора

так и однополярные импульсы тока; в первом случае первичная обмотка сварочного трансформатора включается в диагональ моста последовательно с коммутирующей батареей, во втором — во внешнюю цепь моста.

Наряду с КМ обычного типа, импульсы тока которых не регулируются в процессе сварки, разработано большое число схем КМ с регулируемыми импульсами тока. По способам получения таких импульсов КМ можно условно разделить на машины с комбинированными, модулированными и преобразованными импульсами тока.

В КМ с комбинированными импульсами тока сочетают разрядный ток батареи конденсаторов с током другого рода, получаемым при подключении сварочного трансфор-

матора к электросети или зарядному выпрямителю машины. Дополнительный импульс тока используется для предварительного подогрева свариваемых деталей и для термообработки их между электродами машины.

На рис. 1.6 представлена схема машины, импульс тока которой состоит из трех частей. Заряд батареи C_n до заданного напряжения осуществляется через зарядный выпрямитель $VS1$ при наибольшем вторичном напряжении трансформатора T . После окончания заряда размыкается

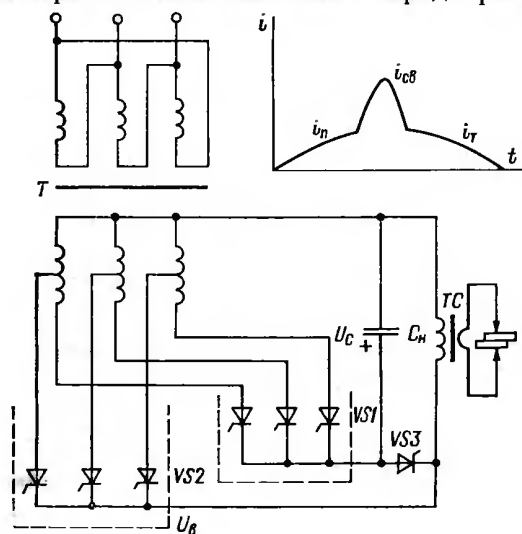


Рис. 1.6. Схема КМ с комбинированным импульсом сварочного тока

зарядная цепь батареи C_n . Пониженное напряжение трансформатора T через выпрямитель $VS2$ подается на первичную обмотку сварочного трансформатора TC , и в сварочном контуре машины протекает подогревный импульс выпрямленного тока i_n . Через заданное время включается тиристор $VS3$, вследствие чего происходит разряд батареи C_n и формируется сварочный импульс тока $i_{св}$. Выпрямитель $VS2$ при этом запирается, так как напряжение U_c на батарее C_n превышает напряжение U_b на выпрямителе $VS2$. При снижении U_c до уровня, при котором напряжение на обмотке трансформатора TC становится ниже напряжения U_b , вновь включается выпрямитель $VS2$. В результате в сварочной цепи проходит импульс выпрямленного тока термообработки i_r , используемый для

замедленного охлаждения свариваемых деталей. Схема позволяет в широком диапазоне регулировать форму импульса сварочного тока, однако относительная сложность конструктивного воплощения и большая масса сварочного трансформатора ограничивают ее применение.

В КМ с модулированными импульсами тока регулирование формы разрядного тока конденсаторов осуществляется чаще всего за счет применения регулируемого сопротивления в разрядной цепи или использования нескольких рабочих батарей конденсаторов. В качестве регулируемых

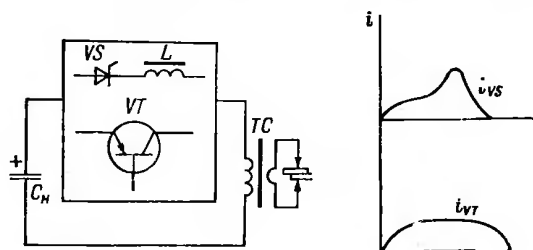


Рис. 1.7. Схема КМ с последовательным регулирующим элементом (дроссель насыщения или транзистор)

сопротивлений используются дроссели с воздушными зазорами в магнитопроводах и с подмагничиванием, а также транзисторы.

На рис. 1.7 показана схема КМ, в разрядную цепь которой включен либо дроссель с воздушным зазором в магнитопроводе, либо транзистор. В начале разряда батареи конденсаторов C_n на первичную обмотку трансформатора TC ток нарастает относительно медленно вследствие большого индуктивного сопротивления дросселя L . После насыщения магнитопровода сопротивление дросселя L резко уменьшается и крутизна фронта нарастания тока увеличивается. Регулирование формы фронта импульса осуществляется изменением воздушного зазора и числа витков обмотки дросселя. Применение дросселя обеспечивает в основном сдвиг максимума тока относительно момента его включения. Для специальных КМ с узким диапазоном изменения сварочного тока схема вполне применима и дает неплохие результаты; для универсальных КМ с широким диапазоном регулирования сварочного тока применение схемы нецелесообразно из-за сложности изготовления и настройки в процессе эксплуатации дросселя L . Транзи-

стор VT в разрядной цепи позволяет получать разрядный ток конденсатора i_{VT} в виде импульсов прямоугольной формы. Применение транзистора дает возможность не только изменить форму тока, но и точно дозировать количество выделяемой при сварке энергии благодаря использованию обратных связей, например по падению напряжения на электродах или по сварочному току. Следует, однако, заметить, что ввиду малой мощности транзистора VT эта схема может найти применение лишь в КМ для микро-

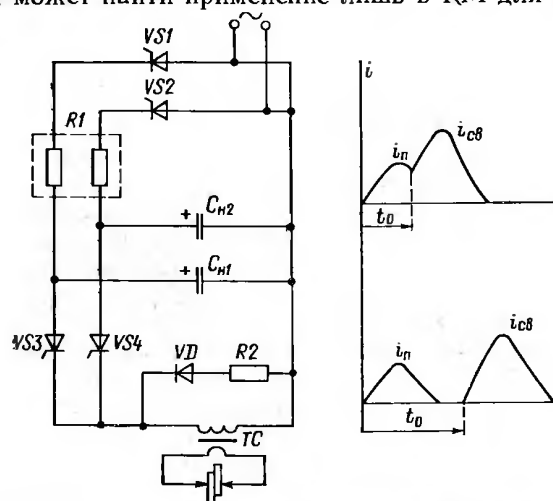


Рис. 1.8. Схема КМ с разделенными цепями заряда и разряда

сварки. В КМ с модулированными импульсами тока, содержащих две и более рабочие батареи конденсаторов, регулирование формы и увеличение длительности импульса тока осуществляются путем последовательного разряда батарей.

На рис. 1.8 изображена схема силовой части КМ, батарей конденсаторов которой имеют разделенные зарядные и разрядные цепи. Катоды тиристоров зарядного выпрямителя $VS1$ и $VS2$ разъединены, и одно плечо выпрямителя включено в зарядную цепь батареи C_{n1} , второе плечо — в цепь батареи C_{n2} . Благодаря этому возможен заряд батарей до разных уровней напряжения: более низкий уровень на батарее C_{n1} получают за счет того, что подачу управляющих импульсов на тиристор $VS1$ прекращают раньше, чем на тиристор $VS2$. При сварке вначале осуществляется разряд батареи C_{n1} через тиристор $VS1$, затем разряд

батареи $C_{н2}$ через тиристор $VS2$, в результате чего формируется импульс тока, состоящий из двух частей: подогревной $i_{п}$ и сварочной $i_{св}$. В зависимости от времени t_0 задержки разряда батареи $C_{н2}$ и уровней напряжения на батареях изменяются форма и амплитуды обеих частей импульса тока. При больших значениях t_0 схема позволяет получать два отдельных импульса тока с регулируемой паузой между ними. Ввиду относительной простоты и во многих случаях достаточной эффективности схема нашла применение в ряде КМ как малой, так и большой мощности.

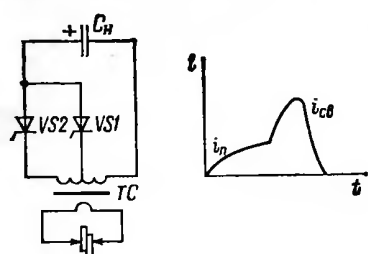


Рис. 1.9. Схема КМ с двойной разрядной цепью

К недостаткам схемы следует отнести трудности управления по времени включением тиристора, коммутирующего сварочный ток, связанные с изменением длительности импульсов $i_{п}$ и $i_{св}$ при изменении емкости батарей конденсаторов и коэффициента трансформации.

Кроме рассмотренных выше схем КМ с модулированными импульсами тока, можно отметить также схемы с управляющей батареей конденсаторов и с двойной разрядной цепью.

В первой КМ модуляция тока осуществляется за счет наложения на процесс разряда рабочей батареи зарядно-разрядных процессов управляющей батареи, подсоединенной к первичной обмотке сварочного трансформатора. Во второй КМ (рис. 1.9) изменение тока происходит за счет переключения разрядных цепей в процессе разряда батареи конденсаторов. Вначале батарея $C_{н}$ разряжается через тиристор $VS2$ на полную первичную обмотку сварочного трансформатора TC . Через заданное время или при заданном напряжении на батарее $C_{н}$ включается тиристор $VS1$, и разряд батареи $C_{н}$ продолжается на часть обмотки трансформатора TC . В результате уменьшения коэффициента трансформации n вторая часть импульса тока имеет более крутой фронт нарастания и большую амплитуду. Первая часть импульса используется для предварительного подогрева, вторая — для сварки деталей. Форма импульса регулируется за счет изменения задержки включения тиристора $VS1$ и соотношения чисел витков секций обмотки трансформатора TC . Схема проста и позволяет весьма эффективно регулировать форму импульса, однако сложность изготовления сварочного трансформато-

ра с отпайками и развиваемые в нем повышенные напряжения порой сдерживают ее применение.

Рассмотренные выше схемы не обеспечивают достаточно широкого регулирования формы импульса сварочного тока, так как не позволяют воздействовать на разряд конденсаторов в процессе сварки или число таких воздействий недостаточно. В настоящее время наибольшие возможности управления током в процессе сварки реализованы в КМ с преобразованными импульсами тока, содержащих в разрядных цепях различного рода инверторы и устройства гашения тока. Преобразование с помощью инверторов разрядного тока батареи в первичный ток повышенной частоты используется для различных целей (во избежание путаницы будем различать импульсы — основной и отдельные, последовательность которых образует основной импульс первичного или сварочного токов). Изменение числа отдельных импульсов в пачке (основном импульсе) позволяет достаточно точно регулировать общее количество энергии, выделяемой в зоне сварки. Изменение амплитуды и скважности отдельных импульсов по обратным связям позволяет автоматически регулировать сварочный ток. Этот способ регулирования осуществляется в КМ с автономным последовательным инвертором (вариант таких схем показан на рис. 1.5).

Наиболее гибкое изменение сварочного тока с целью регулирования тепловыделения в процессе сварки достигается в КМ с периодическим гашением разряда и в КМ с двойным преобразованием тока. Изменение частоты первичного тока в этих КМ позволяет регулировать тепловыделение за счет соответствующего изменения частоты сварочного тока (при подобии импульсов токов) или за счет изменения импульса сварочного тока (при отсутствии подобия импульсов первичного и сварочного токов).

Одна из схем КМ с периодическим гашением разрядного тока в процессе сварки приведена на рис. 1.10, а. При первом включении тиристора $VS2$ происходит заряд коммутирующего конденсатора C_k до напряжения, несколько превышающего напряжение на накопительном конденсаторе C_n с полярностью, отмеченной на рисунке, после чего тиристор $VS2$ выключается. Затем включается тиристор $VS1$, и через него начинается разряд конденсатора C_n на первичную обмотку сварочного трансформатора TC . Одновременно происходит перезаряд конденсатора C_k по цепи индуктивность L — диод $VD1$ — тиристор $VS1$. Через короткий промежуток времени t_1 , в течение которого происходит лишь частичный разряд конденсатора C_n , включа-

ется тиристор $VS2$, в результате чего осуществляется гашение разряда конденсатора C_n вследствие запираания тиристора $VS1$ отрицательным напряжением на конденсаторе C_k . После нового перезаряда конденсатора C_k (аналогично заряду C_k при первом включении $VS2$) выключается тиристор $VS2$ и цикл частичного разряда C_n заканчивается. Затем цикл многократно повторяется. В паузы между разрядами конденсатора C_n первичный ток, замыкающийся через диод $VD2$, поддерживается за счет запасенной в сварочном кон-

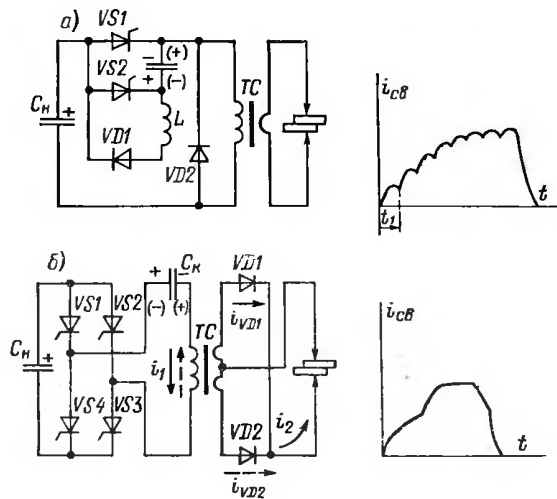


Рис. 1.10. Схемы КМ с частотным регулированием сварочного тока

туре КМ энергии. Форма импульса сварочного тока регулируется за счет изменения частоты следования импульсов разрядного тока путем изменения длительности пауз между включениями тиристоров. Использование при регулировании обратной связи по сопротивлению свариваемых деталей способствует стабилизации качества сварки. Данная схема позволяет изменить $i_{св}$ в весьма широких пределах. Однако существенный недостаток схемы заключается в одностороннем протекании тока разряда через сварочный трансформатор, что вызывает значительное увеличение размеров магнитопровода и, следовательно, массы и объема сварочного трансформатора.

В КМ с двойным преобразованием тока в первичной цепи применяется инвертор, во вторичной — неуправляемый силовой выпрямитель. Разработана и нашла применение схема, где используются последовательный инвертор с обратными диодами и резонансный контур, включенный последовательно с первичной обмоткой сварочного трансформатора. Другая схема КМ, опытный образец которой находится в промышленной эксплуатации, приведена на рис. 1.10, б. В первичной цепи машины имеется мостовой инвертор $VS1—VS4$, в диагональ которого последовательно с коммутирующей батареей C_k включена первичная обмотка сварочного трансформатора TC . При включениях инвертора происходят частичные разряды накопительной батареи C_n , в результате чего по первичной обмотке проходит переменный ток повышенной частоты. При этом во вторичной цепи машины, содержащей неуправляемый выпрямитель на мощных диодах $VD1, VD2$, формируется импульс выпрямленного тока. Регулирование сварочного тока в процессе сварки производится путем изменения длительности пауз между включениями плеч инвертора. Многократное воздействие на сварочный ток, осуществляемое по заданной программе или по обратной связи, обеспечивает формирование импульса сварочного тока практически любой формы. Благодаря глубокому регулированию тока, в том числе длительности импульса, КМ этого типа является наиболее универсальной по технологическим возможностям среди известных КМ. Однако сложность схемы, связанная с этим ненадежность, а также дополнительные потери на диодах и коммутационные в разрядной цепи, приводящие к увеличению емкости батареи конденсаторов на 30—50% по сравнению с традиционными КМ, ограничивают применение этой схемы областью, где высоки требования к качеству сварных соединений или нерегулируемый импульс тока неприемлем по технологии.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СИЛОВАЯ ЗАРЯДНАЯ ЧАСТЬ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН

2.1. Классификация зарядных цепей, содержащих неуправляемые выпрямители и активные токоограничительные элементы

В настоящее время получили широкое распространение схемы заряда конденсаторов через активные, индуктивные и емкостные ограничители тока при различных схемах вы-

прямления сетевого напряжения. Зарядные цепи такого типа просты и удобны в эксплуатации. Практически для всех схем проведены исследования и анализ переходных процессов. Необходимо отметить большой вклад в разработку теории зарядных цепей И. В. Пентегова — сотрудника ИЭС имени Е. О. Патона.

В данном разделе рассмотрим лишь зарядные цепи, содержащие активный токоограничительный элемент. Эти цепи уступают зарядным цепям с реактивными токоограничительными элементами по КПД из-за больших потерь энергии в резисторах. Однако отсутствие переходных процессов в схеме при первоначальном включении и, как следствие, отсутствие перенапряжений, простота и надежность, меньшая стоимость резисторов по сравнению со стоимостью дросселей и конденсаторов являются причиной того, что зарядные цепи с активными токоограничительными элементами получили наиболее широкое применение в практике.

Схемы зарядных цепей различаются по числу фаз выпрямителя: однофазные, трехфазные, многофазные; по характеру соединения вентильных групп: однотактные (с нейтральным проводом), двухтактные (мостовые); по месту включения активных токоограничительных элементов: с резисторами, включенными в каждой фазе выпрямительного устройства (с предвключенными R), с резистором, включенным последовательно с батареей конденсаторов на стороне выпрямленного напряжения (с послевключенным R). В соответствии с этой классификацией на рис. 2.1 изображены различные схемы зарядных цепей с резисторами.

Схема 1 — наиболее простая, однако встречается редко, так как с ее помощью трудно осуществить быстрый заряд батареи конденсаторов большой емкости и зарядный трансформатор (если таковой имеется) работает в режиме вынужденного подмагничивания. Это единственная схема, для которой безразлично, где включен резистор. В схемах 2 и 3 процессы заряда одинаковы и аналогичны процессам в схеме 1 с той лишь разницей, что частота следования импульсов зарядного тока в них в два раза больше. Характер включения не влияет на процессы заряда, и в этом смысле схемы 2 и 3 идентичны. Увеличение массы меди вторичной обмотки зарядного трансформатора в этих схемах компенсируется малым числом вентилялей. Схемы 2 и 3 можно рекомендовать для КМ малой и средней мощности. Наиболее распространены в КМ схемы 4 и 5. В этих схемах увеличение числа вентилялей

компенсируется лучшим использованием зарядного трансформатора. Процессы заряда в схемах идентичны, однако условия работы вентильного моста отличаются. Предвключение резистора в схеме 5 защищает вентили от пиков коммутационных перенапряжений. С другой стороны, если разряд конденсаторов в этой схеме осуществляется без отключения выпрямительного моста, то в случае колебательного процесса разряда при перезаряде конденсаторов

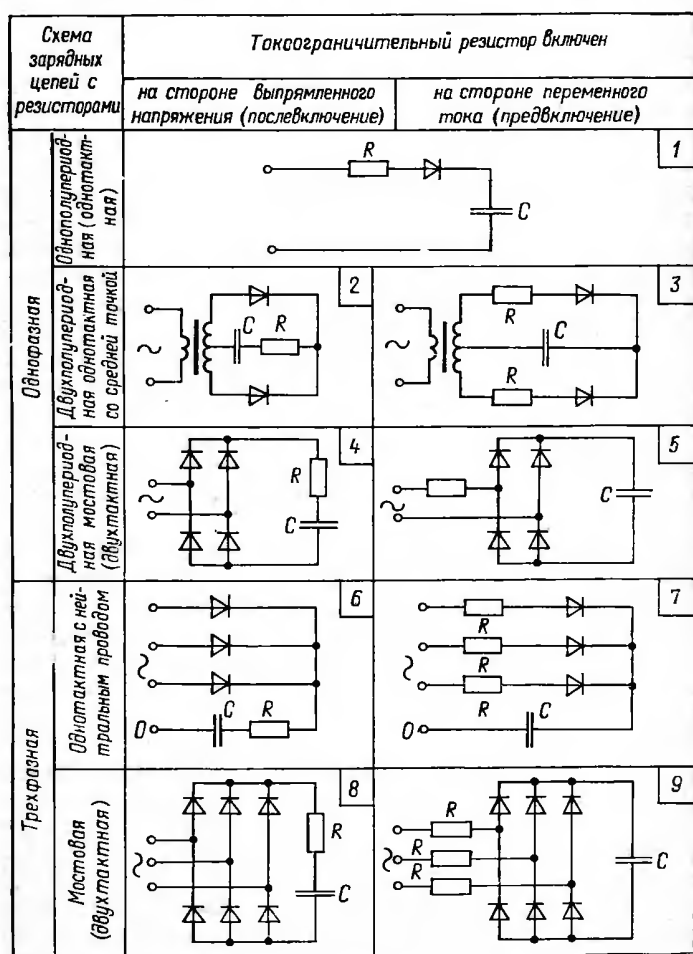


Рис. 2.1. Схемы зарядных устройств с активными токоограничительными элементами

вентили могут выйти из строя из-за перегрузки по току. Этот недостаток отсутствует в схеме 4. Схемы можно рекомендовать для использования в КМ малой и средней мощности.

Следующий класс составляют трехфазные схемы. Для устранения вынужденного намагничивания в схемах 6 и 7 целесообразно соединять вторичную обмотку зарядного трансформатора зигзагом. Обе схемы могут находить применение в КМ средней мощности, однако их нельзя признать наилучшими, поскольку расчетная мощность зарядного трансформатора в этих схемах значительно превышает расчетную мощность зарядного трансформатора для схем 4 и 5 при одних и тех же условиях заряда. Схемы 8 и 9 — трехфазные двухтактные, известные под названием схем Ларионова. Трансформатор в этих схемах магнитоуравновешен, поэтому соединение обмоток может быть любым. Эти схемы целесообразно применять в КМ большой мощности. Что касается защиты вентилей от коммутационных перенапряжений и от перегрузок по току, то для схем 8 и 9 справедливо все сказанное ранее для схем 4 и 5. Схемы 6, 7, 8 и 9 обеспечивают равномерную загрузку всех трех фаз питающей сети. Во всех схемах с включением резистора на стороне переменного тока резистор может быть включен также на первичной стороне зарядного трансформатора. Эти схемы легко сводятся к схемам, изображенным на рис. 2.1, путем пересчета величины R через квадрат коэффициента трансформации и поэтому отдельно не рассматриваются.

Необходимо отметить, что во многих случаях вместо неуправляемых вентилей — диодов в выпрямительных устройствах используются управляемые вентили — тиристоры. Их применение позволяет легко прекращать процесс заряда на время разряда конденсаторов при сварке, а также стабилизировать напряжение на конденсаторах с высокой точностью. Процессы же заряда при фазовом регулировании с ограничением угла проводимости тиристоров отличаются от процессов заряда в аналогичных схемах с неуправляемыми вентилями и имеют худшие энергетические параметры. При этом энергетические параметры тем хуже, чем меньше угол проводимости тиристоров. Исходя из этого, целесообразно для управляемых выпрямительных устройств применять такие способы управления тиристорами, при которых во время заряда угол проводимости тиристора максимальный для конкретной схемы. В этих случаях тиристор эквивалентен диоду и процессы заряда протекают так же, как и в схемах с неуправляемыми вентилями.

2.2. Расчет параметров и элементов зарядных устройств

В большинстве зарядных цепей с активными токоограничительными элементами и вентилями заряд имеет прерывистый характер, причем в процессе заряда изменяется не только значение импульсов зарядного тока, но и их длительность, что затрудняет получение точного аналитического решения. Исключение составляет начальный период заряда в схемах трехфазного выпрямления с резисторами, включенными на стороне выпрямленного напряжения. Для анализа переходных процессов удобнее всего приме-

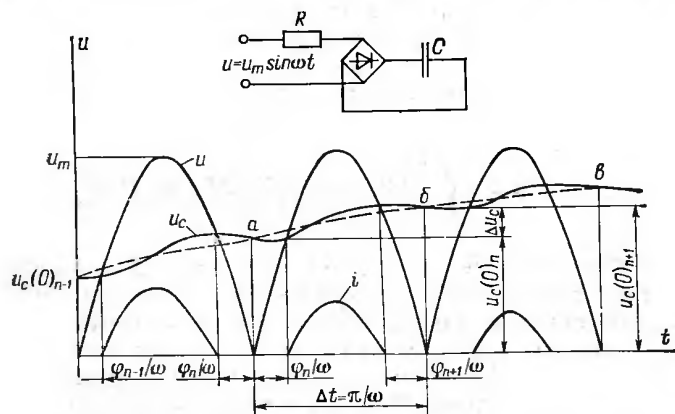


Рис. 2.2. Переходные процессы и усредненная кривая i_c в схеме 5

нять метод усредненных кривых, который заключается в том, что вместо уравнения реальной кривой изменения напряжения на конденсаторах отыскивается уравнение усредненной плавной кривой, пересекающейся с реальной кривой в начале каждого воздействующего полупериода напряжения сети.

Поясним сказанное на примере переходных процессов в цепи 5, изображенных на рис. 2.2. Зарядный ток на каждом из полупериодов заряда протекает лишь в интервале времени, когда напряжение сети больше напряжения на конденсаторах u_c . Поэтому на n -м интервале заряда, к началу которого конденсаторы уже заряжены до напряжения $u_c(0)_n$, момент отпирания вентилей сдвинут относительно начала n -й полуволны синусоиды, как это видно из рисунка, на определенный угол φ_n , связанный с величиной $u_c(0)_n$ равенством

$$\sin \varphi_n = u_c(0)_n / u_m. \quad (2.1)$$

Запирание вентилей наступает в момент, когда напряжение сети вновь становится меньше напряжения на конденсаторах, причем угол φ_{n+1} больше φ_n из-за увеличения напряжения на конденсаторах к концу n -го импульса зарядного тока на Δu_{cn} . Изображенные на рис. 2.2 точки $a, b, в$ лежат на пересечении кривой u_c с вертикалями, восстановленными из начала каждого полупериода напряжения сети. Плавную кривую u_c (штриховая линия), проходящую через точки $a, b, в$, назовем усредненной кривой роста напряжения на конденсаторах. Уравнение этой кривой дает усредненный закон роста напряжения на батарее конденсаторов. Найдем это уравнение, для чего определим приращение напряжения Δu_{cn} для любого n -го интервала заряда T в общем виде как функцию начального напряжения для данного полупериода $u_c(0)_n$. Выражение

$$\Delta u_{cn} = \frac{1}{C} \int_{nT}^{(n+1)T} idt = u_m F \left(\frac{u_c(0)_n}{u_m}, R, C, \omega \right) \quad (2.2)$$

может быть найдено обычными методами. Для этого необходимо рассмотреть включение линейной цепи на напряжение синусоидальной формы при ненулевых начальных условиях $u_c(0)_n$ и найти решение для промежутка времени, на протяжении которого вентиль находится в проводящем состоянии. При длительных процессах заряда напряжение $u_c(0)_n$ в выражении (2.2) можно заменить равным ему по значению напряжением, соответствующим усредненной кривой, и, переходя от дискретных Δu_{cn} и $u_c(0)_n$ к непрерывно изменяющимся Δu_c и u_c , а также рассматривая в качестве переменной величину u_c/u_m , можно переписать выражение (2.2) в виде

$$\Delta u_c = u_m F(u_c/u_m). \quad (2.3)$$

Уточним, что понимается под переходом к непрерывно изменяющимся величинам, связанным с усредненной кривой напряжения на конденсаторах U_c . Каждому значению U_c можно поставить в однозначное соответствие определенное значение φ . Взяв на усредненной кривой любую точку, проведем через нее прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с полуволной синусоиды напряжения источника питания. Угол сдвига фазы точки пересечения относительно начала полуволны синусоиды дает нам значение φ , соответствующее выбранному значению U_c . При этом функциональная связь между рассматриваемыми не-

прерывно изменяющимися величинами имеет вид $U_c = u_m \sin \varphi$, что совпадает с уравнением (2.1) при формальном переходе от дискретных величин к непрерывным.

Для усредненной кривой роста напряжения на конденсаторах справедливо следующее очевидное равенство:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{\Delta u_c}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

где для любой зарядной цепи с активными токоограничительными элементами и числом пульсаций, равным m , величина

$$\Delta t = 2\pi / (m\omega) \quad (2.5)$$

представляет собой интервал времени между точками, в которых усредненная кривая пересекается с реальной кривой напряжения на конденсаторах. Интегрируя уравнение (2.4), получим

$$\int_0^{t_3} dt = \int_{u_{c0}}^{u_{c \text{ ном}}} \Delta t \frac{du_c}{\Delta u_c}. \quad (2.6)$$

Здесь t_3 — время заряда, отсчитываемое от начала процесса; u_{c0} — начальное напряжение на конденсаторах, в общем случае не равное нулю; $u_{c \text{ ном}}$ — номинальное напряжение, до которого осуществляется заряд.

Подставляя в уравнение (2.6) выражения (2.3) и (2.5), запишем уравнение усредненной кривой в виде

$$t_3 = \frac{2\pi}{m\omega} \int_{u_{c0}/u_m}^{u_{c \text{ ном}}/u_m} \frac{d(u_c/u_m)}{F(u_c/u_m)}. \quad (2.7)$$

Формула (2.7) справедлива для любых зарядных цепей, и в нее можно подставить как точные, так и приближенные выражения функции F . В большинстве случаев указанные интегралы не выражаются через элементарные функции и могут быть решены численными или графическими методами. Целесообразно, введя безразмерное время

$$t_3^* = mt_3 / (RC), \quad (2.8)$$

строить графики t_3^* как функции отношения u_c/u_m в безразмерных осях координат. Полученные таким образом безразмерные кривые справедливы для всех зарядных цепей данного типа, не зависят от величин R и C данной цепи и могут быть использованы для определения одной из величин R, t_3 и u_c/u_m при заданных остальных.

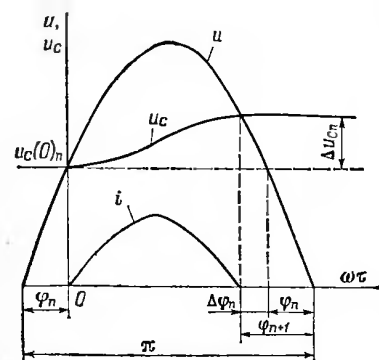


Рис. 2.3. Процессы заряда в однофазных цепях на n -м интервале

щееся начальным для данного полупериода. Рассмотрение и весь последующий анализ будем проводить при допущениях об идеальности неуправляемых клапанов и зарядного трансформатора, отсутствии утечек у конденсаторов, а также для процессов заряда, протекающих относительно медленно — в течение большого числа полупериодов переменного тока. Учтем также, что циклы заряд — разряд периодически повторяются с частотой f .

Процессы на выбранном интервале заряда иллюстрируются рис. 2.3. Условимся время τ отсчитывать от начала n -го импульса тока. Зависимость между углом сдвига φ_n и величиной $u_c(0)_n$ определяется формулой

$$\sin \varphi_n = \frac{u_c(0)_n}{u_m}, \quad (2.9)$$

где u_m — максимальное (амплитудное) значение напряжения сети.

Второе уравнение Кирхгофа для рассматриваемой цепи на интервале, когда клапаны находятся в проводящем состоянии, при включении цепи RC на напряжение синусоидальной формы при ненулевых начальных условиях $u_{c(\tau=0)} = u_c(0)_n$ и в момент, когда напряжение сети равно $u_c(0)_n$, имеет вид:

$$u_c(\tau)_n + RC \frac{du_c(\tau)_n}{d\tau} = u_m \sin(\omega\tau + \varphi_n), \quad (2.10)$$

где $C \frac{du_c(\tau)_n}{d\tau} = i$ — зарядный ток.

Для однофазных схем 1—5, изображенных на рис. 2.1, процессы на интервалах, когда клапаны находятся в проводящем состоянии, описываются одним и тем же дифференциальным уравнением. Отличия заключаются лишь в числе пульсаций. Рассмотрим процесс заряда конденсаторов для любой из этих схем в течение n -го полупериода напряжения сети в середине процесса заряда, когда на конденсаторах уже имеется напряжение $u_c(0)_n$, являю-

Решив уравнение (2.10), найдем значение напряжения на конденсаторах в любой момент времени τ :

$$u_c(\tau)_n = \frac{u_m}{1 + \alpha^2} [\sin(\omega\tau + \varphi_n) - \alpha \cos(\omega\tau + \varphi_n) + \alpha (\cos \varphi_n + \alpha \sin \varphi_n)] e^{-\frac{\omega\tau}{\alpha}}, \quad (2.11)$$

где $\alpha = RC\omega$ — безразмерный параметр.

Процесс заряда на n -м полупериоде прекращается, когда ток проходит через нулевое значение, в момент времени τ_n , равный (рис. 2.3)

$$\tau_n = \frac{\pi - \varphi_n - \varphi_{n+1}}{\omega}. \quad (2.12)$$

В этот момент времени напряжение на конденсаторах становится равным напряжению сети, клапан запирается и напряжение на конденсаторах сохраняется неизменным до следующего импульса зарядного тока. Угол φ_{n+1} при длительном процессе заряда отличается от угла φ_n на небольшую величину $\Delta\varphi_n$:

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + \Delta\varphi_n. \quad (2.13)$$

Как следует из рис. 2.3, для определения приращения напряжения на конденсаторах Δu_{cn} существует простая формула

$$\Delta u_{cn} = u_m (\sin \varphi_{n+1} - \sin \varphi_n). \quad (2.14)$$

Подставляя сюда значение φ_{n+1} из (2.13) и считая, что при малом значении $\Delta\varphi_n$ справедливы приближения:

$$\sin \Delta\varphi_n \approx \Delta\varphi_n; \quad \cos \Delta\varphi_n \approx 1, \quad (2.15)$$

получим

$$\Delta u_{cn} = u_m \cos \varphi_n \Delta\varphi_n. \quad (2.16)$$

Для определения $\Delta\varphi_n$ воспользуемся уравнением зарядного тока, которое может быть получено путем дифференцирования выражения (2.11):

$$i(\tau)_n = C \frac{du_c}{d\tau} = \frac{\omega C u_m}{1 + \alpha^2} \left[\cos(\omega\tau + \varphi_n) + \alpha \sin(\omega\tau + \varphi_n) - (\cos \varphi_n + \alpha \sin \varphi_n) e^{-\frac{\omega\tau}{\alpha}} \right]. \quad (2.17)$$

Из условия равенства тока нулю в момент времени, определяемый формулой (2.12), и учитывая (2.13), после несложных преобразований получим

$$\alpha \sin(\varphi_n + \Delta\varphi_n) - \cos(\varphi_n + \Delta\varphi_n) - (\cos \varphi_n + \alpha \sin \varphi_n) e^{-\frac{\pi - 2\varphi_n - \Delta\varphi_n}{\alpha}} = 0. \quad (2.18)$$

Учитывая приближения (2.15) и считая, что при малом $\Delta\varphi_n$

$$e^{\frac{\Delta\varphi_n}{\alpha}} \approx 1 + \frac{\Delta\varphi_n}{\alpha}, \quad (2.19)$$

из уравнения (2.18) найдем

$$\Delta\varphi_n = \frac{\cos\varphi_n \left(1 + e^{-\frac{\pi-2\varphi_n}{\alpha}}\right) - \alpha \sin\varphi_n \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi_n}{\alpha}}\right)}{\cos\varphi_n \left[\alpha - \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{\pi-2\varphi_n}{\alpha}} + \operatorname{tg}\varphi_n \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi_n}{\alpha}}\right)\right]}. \quad (2.20)$$

Подставляя последнее выражение в (2.16) и переходя к непрерывно изменяющимся Δu_C и φ , найдем

$$\frac{\Delta u_C}{u_m} = \frac{1}{\alpha} \frac{\cos\varphi \left(1 + e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right) - \alpha \sin\varphi \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right)}{1 - \frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}} + \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right)}. \quad (2.21)$$

Здесь Δu_C является функцией угла φ , связанного с усредненным, непрерывно изменяющимся напряжением на конденсаторах зависимостью

$$\sin\varphi = u_C / u_m, \quad (2.22)$$

где осуществлен переход от дискретных φ_n и $u_C(0)_n$ к непрерывным. При выводе уравнения усредненной кривой изменения напряжения на конденсаторах целесообразно в интеграле (2.7) произвести замену переменных и соответственно изменить пределы интегрирования. При этом учтем, что на основании уравнения (2.22)

$$d\left(\frac{u_C}{u_m}\right) = \cos\varphi d\varphi \quad (2.23)$$

и выражение (2.21) представляет собой функцию F из уравнения (2.3). Подставив выражения (2.21) и (2.23) в уравнение (2.7) и умножив правую и левую части последнего на $m/(RC)$, получим уравнение усредненной кривой заряда конденсаторов

$$t_z^* = 2\pi \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\text{ном}}} \frac{1 - \frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}} + \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right)}{\left(1 + e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right) - \alpha \operatorname{tg}\varphi \left(1 - e^{-\frac{\pi-2\varphi}{\alpha}}\right)} d\varphi. \quad (2.24)$$

Здесь t_z^* — безразмерное время, для которого справедливо уравнение (2.8); φ_0 и $\varphi_{\text{ном}}$ — углы, соответствующие величинам u_{C0}/u_m и $u_{C\text{ном}}/u_m$.

Уравнение (2.24) дает возможность построить семейство кривых заряда для различных значений параметра α . Это семейство кривых приведено на рис. 2.4. На оси ординат вместо угла φ отложена более удобная для использования величина u_C/u_m , связанная с φ равенством (2.22).

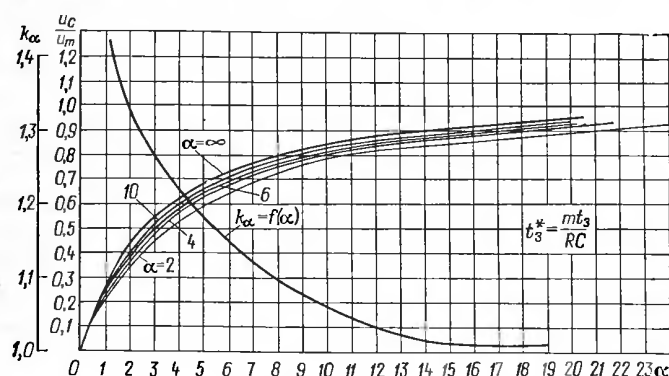


Рис. 2.4. Семейства кривых для однофазных цепей при различных α и зависимость k_α от α

Из рассмотрения семейства кривых видно, что кривые для $\alpha=2, 4, 6$ и 10 могут быть получены путем изменения масштаба предельной кривой $\alpha=\infty$ по оси абсцисс в k_α раз, где k_α — коэффициент, постоянный для конкретного α , но различный для разных α . Зависимость k_α от α приведена на рис. 2.4. Эта зависимость позволяет сделать заключение, что коэффициент k_α для зарядных цепей с $\alpha \geq 20$ практически не отличается от единицы и для расчета параметров в этих зарядных цепях можно пользоваться кривой, которая дает возможность определить время заряда не только для заряда с нуля, но и для заряда конденсаторов с любым начальным значением u_{C0} . Используя формулы

$$t_z = \frac{RC}{m} (t_{z\text{ном}}^* - t_{z0}^*); \quad R = \frac{m t_z}{C (t_{z\text{ном}}^* - t_{z0}^*)}, \quad (2.25; 2.26)$$

где $t_{z\text{ном}}^*$ и t_{z0}^* — безразмерное время, которое определяется по кривой $\alpha=\infty$ на рис. 2.4 соответственно для ординат $u_{C\text{ном}}/u_m$ и u_{C0}/u_m , можно определить время заряда t_z при заданных величинах R, C, u_{C0} и $u_{C\text{ном}}$ либо сопротивление резистора, если заданы t_z, C, u_{C0} и $u_{C\text{ном}}$. В формулах

(2.25) и (2.26) $m=1$ для схемы 1 и $m=2$ для схем 2—5. Эти формулы справедливы при $\alpha \geq 20$, что имеет место в большинстве случаев на практике. При меньших значениях α необходимо учитывать, что масштаб величины $t_{з.ном}^* - t_{з0}^*$, как было показано выше, возрастает в k_α раз.

Для определения энергии потерь в однофазных зарядных цепях с активными токоограничительными элементами проще всего воспользоваться методом динамических вольт-амперных характеристик, предложенным И. В. Пентеговым [8]. Динамические вольт-амперные характеристики можно получить, подав на пластины горизонтального отклонения осциллографа напряжение, пропорциональное u_C , а на вертикальные — сигнал, пропорциональный току заряда i . Площадь, заключенная между кривой вольт-амперной характеристики и осью абсцисс, для любой зарядной цепи, в которой ток не разветвляется, будет пропорциональна энергии потерь в зарядной цепи. В общем виде энергия потерь W для схем 1—5 определяется по формуле

$$W = R C k_3 \int_{u_{C0}}^{u_{Cном}} I_m(u_C) du_C, \quad (2.27)$$

где k_3 — специально введенный общий коэффициент заполнения, равный отношению площади, ограниченной кривой вольт-амперной характеристики и осью абсцисс, к площади, ограниченной треугольником, катеты которого есть оси ординат и абсцисс, а гипотенуза — касательная к максимальным значениям вольт-амперной характеристики.

Вольт-амперные характеристики цепей 1—5 одинаковы при одинаковых параметрах R и C . Закон изменения амплитуд импульсов тока на вольт-амперной характеристике при длительных процессах заряда может быть получен из второго уравнения Кирхгофа:

$$I_m(u_C) = \frac{u_m - u_C}{R} = \frac{u_m}{R} (1 - \sin \varphi), \quad (2.28)$$

составленного для рассматриваемых зарядных цепей в момент времени, когда импульсы зарядного тока достигают своего максимального значения. Уравнение (2.28) доказывает, что огибающая вольт-амперной характеристики представляет собой прямую линию. Отсюда следует, что площадь S вольт-амперной характеристики в рассматриваемом случае равна произведению площади описанного треугольника на общий коэффициент заполнения k_3 , меньший единицы. Подставив (2.28) в (2.27) и учитывая, что $k_3 =$

$= \pi/4$ (вывод здесь не приводится), получим выражение для подсчета энергии потерь в схемах 1—5:

$$W_{1-5} = \frac{\pi}{8} C [(u_m - u_{C0})^2 - (u_m - u_{Cном})^2]. \quad (2.29)$$

Легко подсчитать, что при полном заряде от 0 до u_m энергия потерь составит

$$W_{1-5} = 0,39 C u_m^2. \quad (2.30)$$

Это выражение представляет собой предел, к которому стремится количество энергии, выделяемое в виде тепла в активном сопротивлении зарядной цепи при полном заряде и $\alpha \rightarrow \infty$. Как известно, потери при полном заряде от источника постоянного напряжения равны $0,5 C u_m^2$. Таким образом, потери при заряде конденсаторов через резистор и выпрямитель от однофазной сети переменного тока в общем случае в 1,29 раза меньше, чем при включении цепи RC под постоянное напряжение, но все же достаточно велики.

Расчетная мощность токоограничительного резистора P_R может быть вычислена по формуле

$$P_R = W f, \quad (2.31)$$

где $f = 1/(t_s + t_n)$ — частота следования зарядных циклов; t_n — время паузы между зарядными циклами.

Расчетное значение среднего квадратического (действующего, или эффективного) значения зарядного тока можно легко получить, используя выражение (2.31):

$$I_{эф.з} = \sqrt{W f / R}. \quad (2.32)$$

Мощность вторичной обмотки однофазного зарядного трансформатора будет равна

$$P_2 = u_{эф} I_{эф.з}, \quad (2.33)$$

где $u_{эф} = u_m / \sqrt{2}$.

Определив потери W по формуле (2.29), можно легко рассчитать другие параметры зарядной цепи по формулам (2.31)—(2.33). Так, для схем 1, 2, 4 и 5 расчетная мощность резистора при периодически повторяющемся цикле заряда равна

$$P_{R(1,2,4,5)} = \frac{\pi}{8} f C u_m^2 \left[\left(1 - \frac{u_{C0}}{u_m}\right)^2 - \left(1 - \frac{u_{Cном}}{u_m}\right)^2 \right]. \quad (2.34)$$

Для схемы 3 мощность P_R для каждого из резисторов в два раза меньше значения, определяемого по формуле

(2.34), так как та же энергия потерь распределяется поровну между двумя резисторами.

Конечный вид формул для определения $I_{\text{эф.з}}$ и P_2 в схемах 1—5 будет различным в связи с тем, что в схемах 4 и 5 через конденсатор C в любой момент времени течет тот же ток, что и во вторичной обмотке зарядного трансформатора, в схемах 2 и 3 ток в каждой из половин вторичной обмотки зарядного трансформатора течет только в полупериоды одной полярности и каждая из обмоток работает с ПВ=50%, в схеме же 1 ток во вторичной обмотке протекает лишь в одну из полуволин сетевого напряжения. Учитывая это и одинаковые условия заряда для всех цепей, найдем действующие токи и мощность зарядного трансформатора для схем 1—5 (индекс в скобках обозначает номера схем, к которым относится рассматриваемая величина):

$$I_{\text{эф.з(4,5)}} = I_{\text{эф2(4,5)}} = I'_{\text{эф1(4,5)}} = \sqrt{\frac{P_R}{R}} = \sqrt{\frac{\pi f C u_m^2}{8 R} \left[\left(1 - \frac{u_{C0}}{u_m}\right)^2 - \left(1 - \frac{u_{C_{\text{НОМ}}}}{u_m}\right)^2 \right]}; \quad (2.35)$$

$$P_{\tau(4,5)} = \frac{P_1 + P_2}{2} = P_{1(4,5)} = P_{2(4,5)} = u_{\text{эф}} I_{\text{эф.з(4,5)}} = \sqrt{\frac{\pi f}{32} \frac{C^2 u_m^4}{t_s} \left[\left(1 - \frac{u_{C0}}{u_m}\right)^2 - \left(1 - \frac{u_{C_{\text{НОМ}}}}{u_m}\right)^2 \right] (t_{\text{з.НОМ}}^* - t_{\text{з0}}^*)}; \quad (2.36)$$

$$P_{2(2,3)} = u_{\text{эф(2,3)}} I_{\text{эф2(2,3)}} = 2 u_{\text{эф(2)}} \frac{I_{\text{эф.з(5)}}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} P_{\tau(5)}; \quad (2.37)$$

$$I'_{\text{эф1(2,3)}} = I'_{\text{эф1(5)}}; \quad (2.38)$$

$$P_{1(2,3)} = u_{\text{эф}} I'_{\text{эф1(2,3)}} = u_{\text{эф}} I'_{\text{эф1(5)}} = P_{\tau(5)}; \quad (2.39)$$

$$P_{\tau(2,3)} = \frac{P_{1(2,3)} + P_{2(2,3)}}{2} = P_{\tau(5)} \left(\frac{1 + \sqrt{2}}{2} \right) = 1,21 P_{\tau(5)}; \quad (2.40)$$

$$I_{\text{эф.з(1)}} = I_{\text{эф2(1)}} = \sqrt{2} I_{\text{эф.з(5)}}; \quad (2.41)$$

$$P_{2(1)} = u_{\text{эф}} I_{\text{эф2(1)}} = \sqrt{2} P_{\tau(5)}. \quad (2.42)$$

Здесь $I_{\text{эф2}}$ — действующий вторичный ток зарядного трансформатора; $I'_{\text{эф1}}$ — действующий приведенный ко вторичной обмотке первичный ток зарядного трансформатора; P_1 и P_2 — соответственно расчетные мощности первичной и

вторичной обмоток зарядного трансформатора; P_{τ} — расчетная (габаритная) мощность зарядного трансформатора.

Расчетная мощность трансформатора для схемы 1 не находилась, так как для этого необходимо учитывать значение намагничивающего тока, которое в этой схеме велико в связи с односторонним протеканием тока. Очевидно, что эта мощность будет значительно превышать аналогичную для схем 4 и 5, поэтому применение зарядной цепи 1 нецелесообразно.

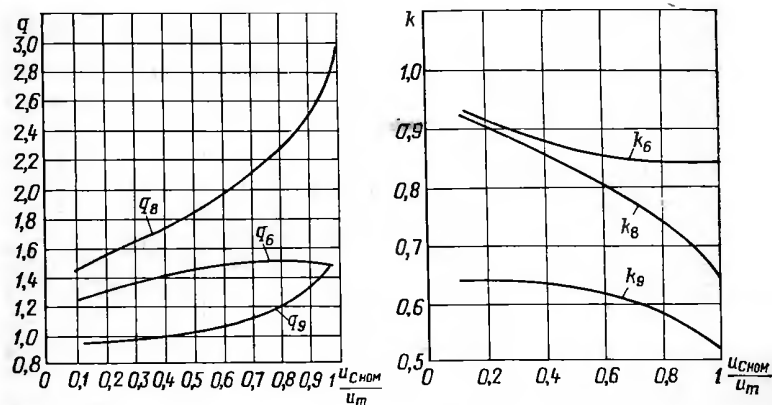


Рис. 2.5. Зависимость коэффициентов k и q табл. 2.1 от $u_{C_{\text{НОМ}}}/u_m$

Расчеты параметров токоограничительного резистора, токов и мощностей для трехфазных схем 6—9 носят сложный характер, отличаются от расчетов аналогичных величин для схем 1—5 и здесь не приводятся. Результаты же этих расчетов сведены в табл. 2.1, где приведены отношения ряда параметров в различных цепях к соответствующим параметрам в зарядной цепи 5 при одинаковых условиях заряда, т. е. при одинаковых значениях t_s , C , $u_{C_{\text{НОМ}}}/u_m$, а также при $u_{C0}=0$. Все эти отношения представляют собой либо постоянные числовые величины, либо функции безразмерных параметров q и k , которые, в свою очередь, при $u_{C0}=0$ являются функциями одной переменной $u_{C_{\text{НОМ}}}/u_m$ и изображены на рис. 2.5 в виде кривых. Зная параметры какой-нибудь одной зарядной цепи, можно с помощью таблицы и кривых рассчитать параметры любой другой зарядной цепи, при которых обеспечиваются те же условия заряда. Единственное, что сужает возможности применения таблицы, это то, что она справедлива для слу-

Таблица 2.1

Параметр	Обозначение	Номер схемы								
		1	2	3	4	5	6**	7**	8	9
Число фаз	—	1			3			3		
Число пульсаций	—	1	2				3	6		
Сопротивление каждого из резисторов	R^*	$1/2$	1				q_0	$3/2$	q_0	q_0
Мощность каждого из резисторов	P^*_R	1	$1/2$	1				$q_0 k^2$	$1/3$	$q_0 k^2$
Действующий зарядный ток	$I^*_{эф.з}$	$\sqrt{2}$	1				k_0	—	k_0	—
Действующий вторичный фазный ток	$I^*_{эф.з}$	$\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	1				$k_0/\sqrt{3}$	$\sqrt{2}/3$	$\sqrt{\frac{2}{3}} k_0$
Действующий первичный фазный ток	$I^*_{эф.п}$	—	1				$\sqrt{\frac{2}{3}} k_0$	$2/3$	$\sqrt{\frac{2}{3}} k_0$	k_0
Начальная амплитуда тока через вентиль Зарядный трансформатор:	I^*_m	2	1				$1/q_0$	$2/3$	$1/q_0$	$\frac{1}{\sqrt{3}} q_0$
пиковая мощность фазы	$P^*_п$	$\sqrt{2}$	1				$\frac{0,56}{q_0}$	0,362	$\frac{0,638}{q_0}$	$\frac{1}{3q_0}$
суммарная мощность вторичных обмоток	P^*_2	$\sqrt{2}$	1				$2k_0$	1,63	$\sqrt{2} k_0$	$\sqrt{3} k_0$
суммарная мощность первичных обмоток	P^*_1	—	1				$\sqrt{2} k_0$	1,13	$\sqrt{2} k_0$	$\sqrt{3} k_0$
расчетная мощность	$P^*_T = \frac{P^*_1 + P^*_2}{1}$	—	1,21	1				$1,71 k_0$	1,39	$\sqrt{2} k_0$

* В таблице приведены отношения указанных величин к соответствующим величинам для схемы 5 при одинаковых условиях заряда.
 ** Расчет для схем 6 и 7 проводился для соединения обмоток зарядного трансформатора звезда — зигзаг.

чая, когда $u_{C0} = 0$, если рассматриваются зарядные цепи 6, 8, 9. Для остальных зарядных цепей таблица справедлива при любых, но одинаковых для всех схем значениях u_{C0}/u_m и $u_{C\text{ ном}}/u_m$ и позволяет провести расчет параметров этих зарядных цепей при ненулевых условиях заряда.

Следует отметить, что расчеты для схем 6 и 7 проводились при соединении первичной и вторичной обмоток зарядного трансформатора по схеме звезда — зигзаг (рис. 2.6). Вторичные обмотки в этих схемах целесообразно соединять зигзагом для устранения вынужденного намагничивания, которое возникает при одностороннем направлении тока при соединении звездой или треугольником. При соединении зигзагом каждый вентиль питается от последовательно соединенных двух половин вторичных

фазных обмоток, расположенных на различных стержнях трансформатора. При этом в половинах вторичных обмоток, расположенных на каждом стержне, протекают токи противоположного направления и МДС, соответствующие постоянным составляющим этих токов, взаимно компенсируются. Трансформатор магнитоуравновешен.

Рассмотрение данных табл. 2.1 (последняя строка) и рис. 2.5 позволяет сделать вывод, что при заряде до $u_{C\text{ ном}}/u_m \leq 0,77$ минимальные расчетные мощности, габариты и массу имеет трансформатор в зарядных цепях 4 и 5. При заряде до $u_{C\text{ ном}}/u_m > 0,77$ наименьшую расчетную мощность имеет зарядный трансформатор в цепи 9; зарядная цепь 8 в этом смысле несколько уступает цепи 9 и имеет меньшую, чем в цепях 4 и 5, расчетную мощность зарядного трансформатора лишь при соотношении $u_{C\text{ ном}}/u_m > 0,85$. Расчетные мощности зарядных трансформаторов в схемах 1, 2, 3, 6, 7 значительно превышают аналогичные в схемах 4, 5, 8, 9, и поэтому применение зарядных цепей 1, 2, 3, 6, 7 связано с существенным проигрышем в габаритах и массе всего зарядного устройства.

Представляет интерес зависимость расчетных мощностей трансформаторов от $u_{C\text{ ном}}/u_m$ для каждой схемы. В частном случае заряда при $u_{C0} = 0$ расчетная мощность трансформатора для схемы 5 может быть рассчитана по формуле (2.36). При $u_{C0} = 0$ величина $t_{30} = 0$ и формула (2.36) приобретает вид

$$P_{T(5)} = \sqrt{\frac{f}{t_3}} C u^2_{C\text{ ном}} P^*_{T(5)}, \quad (2.43)$$

где $P^*_{T(5)}$ — расчетная мощность зарядного трансформатора в относительных единицах, являющаяся безразмерной функцией $u_{C\text{ ном}}/u_m$ и равная

$$P^*_{T(5)} = \sqrt{\frac{\pi t^*_{3, \text{ ном}}}{32} \frac{2 \frac{u_{C\text{ ном}}}{u_m} - \left(\frac{u_{C\text{ ном}}}{u_m}\right)^2}{\left(u_{C\text{ ном}}/u_m\right)^4}}, \quad (2.44)$$

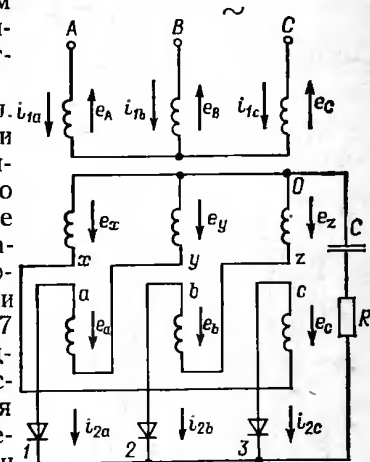


Рис. 2.6. Зарядная цепь 6 с включением зарядного трансформатора по схеме звезда — зигзаг

где значения $t_{з.ном}^*$ определяются по кривой $\alpha=\infty$ на рис. 2.4. Так как для любой зарядной цепи связь между P_T и P_T^* аналогична (2.43)

$$P_{T(n)} = \sqrt{\frac{f}{t_3}} C u_{C ном}^2 P_{T(n)}^* \quad (2.45)$$

то при одних и тех же t_3 , C , $u_{C ном}$ и f

$$P_{T(n)}/P_{T(5)} = P_{T(n)}^*/P_{T(5)}^* \quad (2.46)$$

Поэтому отношения, полученные для P_T при одинаковых условиях заряда, справедливы и для P_T^* .



Рис. 2.7. Зависимости расчетной мощности трансформатора схем 2—9 от $u_{C ном}/u_m$

чем значении $u_{C ном}/u_m$, что позволяет получить минимальные габариты и массу всего зарядного устройства.

2.3. Зарядные устройства с принудительной коммутацией тока через тиристор

Зарядные устройства, рассматриваемые в этом параграфе, и принципы коммутации зарядного тока в них применяются в КМ без режима подзаряда конденсаторов или, как еще называют эти машины, в КМ с релаксационным сбросом напряжения (см. § 1.3). Второе название, однако,

не совсем точно, так как в некоторых схемах, в частности в шовных КМ, разряд конденсаторов производят не сразу после достижения напряжением заданного значения.

Рассмотрим принципы принудительного выключения зарядного тиристора на примере схем, показанных на рис. 2.8. Зарядная цепь в одной схеме — однофазная, в другой — трехфазная. Заряд и стабилизация напряжения на батарее конденсаторов C_H в однофазной зарядной цепи (рис. 2.8, а) осуществляются следующим образом. На зарядный тиристор $VS1$ подаются управляющие импульсы

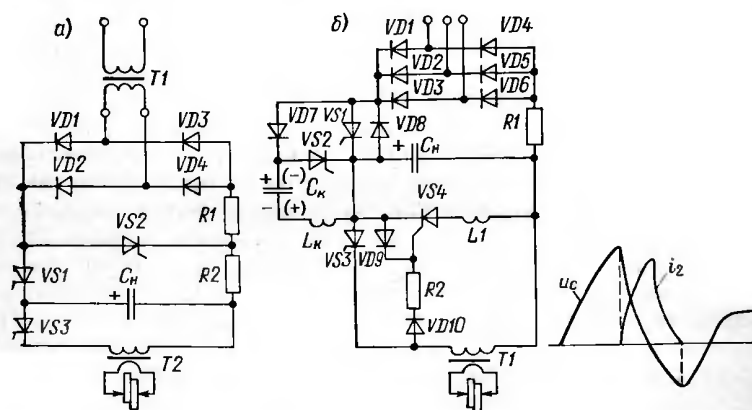


Рис. 2.8. Схемы зарядных цепей с принудительной коммутацией тока через тиристор

повышенной частоты (до 1 кГц), что обеспечивает максимальный угол проводимости тиристора во время заряда, а вместе с ним и минимальное время заряда. В § 2.2 отмечалось, что в этом режиме работы тиристор подобен диоду, поэтому расчет времени заряда, мощности и других параметров можно производить по методам, изложенным в этом параграфе. По достижении заданного напряжения на батарее конденсаторов C_H в схеме управления (на рисунке не показана) срабатывает спусковое устройство (компаратор, пороговое устройство и т. д.), в результате чего выдается импульс на включение шунтирующего тиристора $VS2$ и прекращаются импульсы, включающие тиристор $VS1$. Тиристор $VS2$ включается, тиристор $VS1$ выключается, при этом зарядный ток коммутируется с последнего на первый. Процесс коммутации тока здесь протекает очень быстро, чему немало способствует то, что к

тиристор $VS1$ при включении $VS2$ прикладывается обратное напряжение, равное напряжению на батарее конденсаторов C_n . Шунтирующий тиристор $VS2$ выключается естественным образом, когда напряжение на выходе мостового выпрямителя $VD1-VD4$ достигает нулевого значения.

Рассмотренная схема проста, надежна в эксплуатации, однако ее применение ограничено, во-первых, однофазными цепями заряда в связи с естественным режимом выключения тиристора $VS2$, во-вторых, режимами малых токов (десятки ампер), так как большие значения зарядного тока связаны с уменьшением сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$, увеличением постоянной времени шунтирующей цепи и вследствие этого ухудшением условий выключения шунтирующего тиристора $VS2$.

Заряд батареи конденсаторов C_n в схеме на рис. 2.8,б происходит от трехфазного мостового выпрямителя $VD1-VD6$, однако в этой схеме может быть применен и любой другой выпрямитель. Для выключения зарядного тиристора $VS1$ параллельно ему включено специальное коммутирующее устройство, состоящее из вспомогательного диода $VD7$, шунтирующего диода $VD8$, коммутирующего тиристора $VS2$, а также коммутирующих дросселя L_k и конденсатора C_k . Дополнительно на схеме приведены тиристор $VS4$ и дроссель L_1 , применение которых в значительной степени улучшает параметры зарядной цепи, а также разрядный тиристор $VS3$.

Рассмотрим работу схемы и принципы коммутации тока в зарядном тиристоре $VS1$. При подаче напряжения на выпрямитель $VD1-VD6$ заряжается коммутирующий конденсатор C_k через диод $VD7$, дроссель L_k , батарею конденсаторов C_n и токоограничительный резистор $R1$. Конденсатор C_k заряжается до напряжения, равного амплитуде напряжения на выходе выпрямителя, так как $C_k \ll C_n$. При включении тиристора $VS1$ заряжается батарея конденсаторов C_n . Когда напряжение на конденсаторах C_n достигает заданного значения, включается тиристор $VS2$ и конденсатор C_k быстро перезаряжается через дроссель L_k . Добротность контура выбирается высокой, поэтому перезаряд C_k протекает почти без потерь. По окончании первого перезаряда начинается обратный перезаряд C_k , но уже через тиристор $VS1$ и диод $VD7$. Перезаряд через тиристор $VS1$ длится до тех пор, пока ток коммутации не станет равным зарядному току, после чего тиристор $VS1$ выключается, а ток коммутации переходит на диод $VD8$. Ток через диод $VD8$ равен разности токов коммутации и

заряда; поэтому прохождение тока через диод $VD8$ прекращается, когда ток коммутации становится меньше зарядного тока. Здесь необходимо отметить, что длительность процесса перезаряда C_k , а с ней и всего коммутационного процесса очень мала и составляет десятки микросекунд, поэтому напряжение на батарее конденсаторов C_n за время коммутации практически не изменяется.

Найдем, какие коммутирующие величины C_k и L_k являются оптимальными для устойчивого и надежного выключения зарядного тиристора $VS1$. За условие надежного выключения примем, что ток коммутации i_k должен превышать ток заряда I_s в течение интервала t_0 , который должен быть больше полного времени выключения тиристорной цепи заряда [3]. На рис. 2.9 показаны три возможных вида импульсов тока коммутации, которые удовлетворяют этому условию. Параметр λ равен отношению I_{km}/I_s , где I_{km} — максимальное значение коммутирующего тока. Оптимальная форма импульса та, при которой требуется наименьшее количество энергии для его получения. В дальнейших рассуждениях примем, что коммутирующий контур имеет большое значение Q (добротность) при собственной резонансной частоте, т. е. потери в нем незначительны. Из рис. 2.9 видно, что

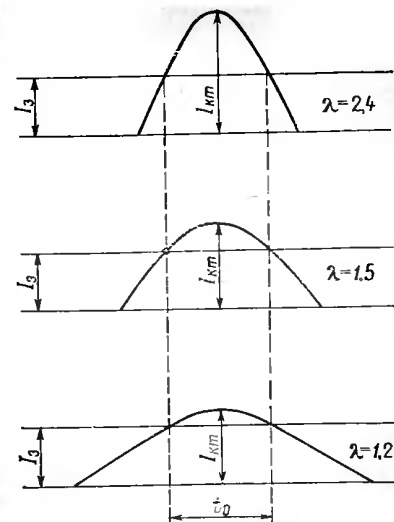


Рис. 2.9. Импульс коммутирующего тока

$$\cos \frac{\omega t_0}{2} = \frac{I_s}{I_{km}} = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.47)$$

где

$$\omega = 1/\sqrt{L_k C_k}, \quad (2.48)$$

поэтому

$$\frac{t_0}{\sqrt{L_k C_k}} = 2 \arccos \frac{1}{\lambda} = g(\lambda). \quad (2.49)$$

Энергия, которую должен обеспечить коммутирующий контур, чтобы тиристор выключился, равна

$$W = \frac{1}{2} C_k U_{ск}^2 = \frac{1}{2} L_k I_{кн}^2; \quad (2.50)$$

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{L_k C_k} U_{ск} I_{кн}; \quad (2.51)$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{t_0}{2 \arccos \frac{1}{\lambda}} U_{ск} \lambda I_3. \quad (2.52)$$

Преобразовав выражение (2.52) так, чтобы правая часть была функцией только параметра λ , получим

$$\frac{W}{U_{ск} I_3 t_0} = \frac{\lambda}{4 \arccos \frac{1}{\lambda}} = h(\lambda). \quad (2.53)$$

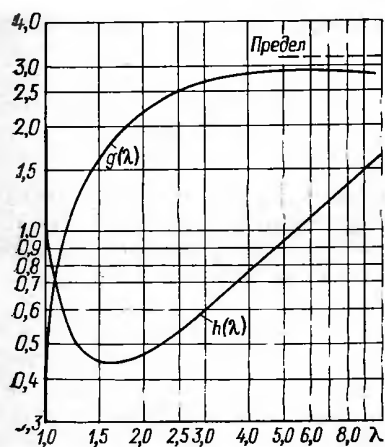


Рис. 2.10. Функции коммутационных параметров $g(\lambda)$, $h(\lambda)$

Функции $g(\lambda)$ и $h(\lambda)$ в соответствии с уравнениями (2.49) и (2.53) показаны на рис. 2.10. Из кривой $h(\lambda)$ видно, что нормализованная энергия коммутации $W/(U_{ск} I_3 t_0)$ имеет минимальное значение 0,446 при $\lambda=1,5$, соответствующем среднему импульсу на рис. 2.9. Величина $t_0/\sqrt{L_k C_k}$ в этой точке равна 1,68.

В расчете коммутирующего контура величины $U_{ск}$, I_3 , t_0 и λ должны быть выбраны для максимального тока прерывания (I_3) и минимального напряжения источника питания; обозначим их индексом 0. Искомые величины C_k и L_k будут равны

$$C_k = \frac{\lambda_0}{g(\lambda_0)} = \frac{I_{30} t_{00}}{U_{ск0}} = 0,893 \frac{I_{30} t_{00}}{U_{ск0}}; \quad (2.54)$$

$$L_k = \frac{1}{\lambda_0 g(\lambda_0)} \frac{U_{ск0} t_{00}}{I_{30}} = 0,397 \frac{U_{ск0} t_{00}}{I_{30}}; \quad (2.55)$$

где значения параметров приняты оптимальными: $\lambda_0=1,5$; $g(\lambda_0)=1,68$. Собственная частота коммутирующего кон-

тура

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_k C_k}} = \frac{g(\lambda_0)}{2\pi t_{00}} = \frac{0,267}{t_{00}}. \quad (2.56)$$

Ширина импульса

$$\pi \sqrt{L_k C_k} = \frac{\pi t_{00}}{g(\lambda_0)} = 1,87 t_{00}. \quad (2.57)$$

Для учета потерь в коммутирующем контуре значение $U_{ск0}$ в уравнениях (2.54) и (2.55) следует умножить на $e^{-\pi/(4Q)}$.

Пример расчета L_k и C_k . Пусть требуется рассчитать коммутирующие индуктивность и емкость в схеме на рис. 2.8,б при следующих параметрах зарядной цепи: максимальное значение напряжения (амплитуда) на выходе мостового выпрямителя $VD1-VD6$ равно 900 В ($U_{V \max}=900$ В), минимальное значение напряжения на батарее конденсаторов C_n равно 100 В ($U_{C \min}=100$ В), сопротивление резистора $R1$ составляет 10 Ом ($R1=10$ Ом). В качестве зарядного тиристора применен тиристор типа ТЧ-100 со временем выключения 50 мкс ($t_0=50$ мкс). Найдем максимальное значение зарядного тока I_{30} , при котором надо выключить тиристор $VT1$:

$$I_{30} = \frac{U_{V \max} - U_{C \min}}{R_1} = \frac{900 - 100}{10} = 80 \text{ A.}$$

Считаем, что начальное напряжение на коммутирующем конденсаторе C_k равно максимальному напряжению на выходе выпрямителя, т. е. $U_{ск0}=900$ В. Принимаем также, что $t_{00}=100$ мкс, учитывая пониженное значение обратного напряжения на тиристоре $VS1$, которое равно 1 В. Тогда из формул (2.54) и (2.55) находим C_k и L_k :

$$C_k = 0,893 \frac{I_{30} t_{00}}{U_{ск0}} = 0,893 \frac{80 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{900} \approx 8,0 \text{ мкФ};$$

$$L_k = 0,397 \frac{U_{ск0} t_{00}}{I_{30}} = 0,397 \frac{900 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{80} \approx 450 \text{ мкГн.}$$

Назначение тиристора $VS4$ и дросселя $L1$ состоит в том, чтобы полезно использовать энергию, остающуюся в батарее конденсаторов C_n в результате ее перезаряда при колебательном процессе разряда, который практически имеет место во всех КМ. Когда отрицательное напряжение («минус» на правой обкладке) на батарее C_k достигает максимального значения, ток в разрядной цепи становится равным нулю и тиристор $VS3$ выключается. При этом к тиристору $VS3$ прикладывается обратное напряжение, равное напряжению на C_k . Это напряжение создает в цепи диода $VD10$ и резистора $R2$ ток, который включает тиристор $VS4$. Происходит колебательный перезаряд C_n через $VS4$ и $L1$. При высокой добротности контура батарея конденсаторов C_k перезаряжается с минимальными потерями

ми. Это позволяет значительно снизить зарядный ток, а с ним и мощность. В шовной машине МШК-1602, серийно выпускаемой заводом «Электрик», эти величины снижены более чем в 1,5 раза по сравнению с традиционными схемами, где возврата энергии не происходит.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СИЛОВАЯ РАЗРЯДНАЯ ЧАСТЬ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН

3.1. Экспериментальное определение R, L, C -параметров конденсаторной машины

Активное сопротивление R сварочного контура импульсу сварочного тока, индуктивность L контура и емкость C батарей конденсаторов, а также коэффициент трансформации n и напряжение U_{C0} являются важнейшими параметрами, определяющими технологические возможности КМ. Знание этих параметров необходимо при расчете различных элементов силовой части, в том числе сварочного трансформатора, тиристоров, а также при проверке этих параметров в эксплуатации. Для определения индуктивности и активного сопротивления КМ существуют различные методы. Один из них — опыт короткого замыкания сварочного контура, проведенный при пониженном питающем сварочный трансформатор напряжении частотой 50 Гц, после чего активное сопротивление пересчитывается с учетом частоты, эквивалентной импульсу сварочного тока. Другой — отыскание параметров контура по декременту колебаний. Для этого снимается осциллограмма тока разряда, по ней определяется декремент затуханий и производятся соответствующие вычисления. Вычисления получаются проще, а результаты более точными, когда формулы процессов, происходящих в цепи разряда, выражаются в функции параметра p [12]. В этом случае можно легко определять R, L, C -параметры даже в случае аperiodического разряда.

Для контура разряда КМ справедливо дифференциальное уравнение

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0. \quad (3.1)$$

Приведем его решение при различных соотношениях $\delta = R/(2L)$ и $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$:

при $\delta < \omega_0$ (колебательный разряд)

$$i = \frac{U_{C0}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t = I_0 e^{-\delta t} \frac{\omega_0}{\omega} \sin \omega t; \quad (3.2)$$

при $\delta = \omega_0$ (предельный случай аperiodического разряда)

$$i = \frac{U_{C0}}{L} t e^{-\delta t} = I_0 \omega_0 e^{-\delta t}; \quad (3.3)$$

при $\delta > \omega_0$ (аperiodический разряд)

$$i = \frac{U_{C0}}{2L \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} e^{-\delta t} (e^{\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} t} - e^{-\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} t}) = \\ = I_0 \frac{\omega_0 e^{-\delta t}}{\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \operatorname{sh} \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} t. \quad (3.4)$$

В этих формулах U_{C0} — напряжение, до которого были заряжены конденсаторы перед разрядом, В; $\delta = R/(2L)$ — коэффициент затухания контура, c^{-1} ; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — угловая частота колебаний тока в цепи при отсутствии в ней активного сопротивления ($R=0$), c^{-1} ; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — угловая частота собственных затухающих колебаний, c^{-1} ; $I_0 = U_{C0} \sqrt{C/L}$ — амплитудное значение тока в цепи с $R=0$, А. Введем параметр p :

$$p = \delta/\omega_0 = R \sqrt{C/L}/2 = R I_0 / (2U_{C0}) = R / (2R_0), \quad (3.5)$$

где $R_0 = U_{C0}/I_0 = \sqrt{L/C}$ — волновое сопротивление, Ом. Обозначим через B отношение текущего времени t к четверти периода T_0 в случае $R=0$, т. е.

$$B = 4t/T_0 = 4t\omega_0/(2\pi) = 2t/(\pi \sqrt{LC}). \quad (3.6)$$

Произведем преобразования:

$$\delta t = \frac{R}{2L} t = \frac{2R_0 p \pi B}{2L 2\omega_0} = \frac{1}{2} p \pi B; \\ \omega t = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{4p^2 R_0^2}{4L^2}} \frac{2\pi B}{4\omega_0} = \frac{1}{2} \pi B \sqrt{1 - p^2} \quad (3.7)$$

Учитывая (3.5) — (3.7), выразим (3.2) — (3.4) через параметр p :

при $\delta < \omega_0 (p > 1)$

$$i = I_0 \frac{\exp(-\pi B p / 2)}{\sqrt{1-p^2}} \sin \frac{\pi B \sqrt{1-p^2}}{2}; \quad (3.8)$$

при $\delta = \omega_0 (p = 1)$

$$i = \frac{1}{2} I_0 \pi B \exp\left(-\frac{1}{2} \pi B p\right); \quad (3.9)$$

при $\delta > \omega_0 (p > 1)$

$$i = I_0 \frac{\exp(-\pi B p / 2)}{\sqrt{p^2-1}} \operatorname{sh}\left(\frac{1}{2} \pi B \sqrt{p^2-1}\right). \quad (3.10)$$

Если теперь выражения (3.8)–(3.10) поделить на амплитуду тока I_0 , то получится зависимость отношения $A = i/I_0$ от B . Эта зависимость при различных значениях p

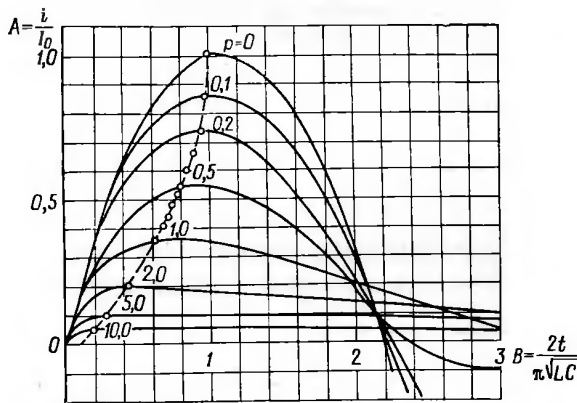


Рис. 3.1. Кривые тока в относительных единицах при различном активном сопротивлении цепи

представлена на рис. 3.1. Разделим равенства (3.8)–(3.10) на I_0 , возьмем производную по B и приравняем ее нулю. Тогда для случая $\delta < \omega_0 (p < 1)$ получим

$$\frac{dA}{dB} = -\frac{\pi p \exp(-\pi B p / 2)}{2\sqrt{1-p^2}} \sin \frac{\pi B \sqrt{1-p^2}}{2} + \frac{\pi \exp(-\pi B p / 2)}{2} \cos \frac{\pi B \sqrt{1-p^2}}{2} = 0.$$

Из этого выражения для случая $0 < p < 1$ находим

$$B = \frac{2}{\pi} \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{1-p^2}/p}{\sqrt{1-p^2}} = \frac{2}{\pi} \frac{\arcsin \sqrt{1-p^2}}{\sqrt{1-p^2}} \quad (3.11)$$

и, подставляя (3.11) в (3.8), определяем

$$A = \frac{i}{I_0} = \exp \frac{-p \arcsin \sqrt{1-p^2}}{\sqrt{1-p^2}}. \quad (3.12)$$

Примем $p \rightarrow 0$ и найдем

$$B = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{2}{\pi} \frac{\arcsin \sqrt{1-p^2}}{\sqrt{1-p^2}} = 1;$$

$$A = \lim_{p \rightarrow 0} \exp\left(-\frac{p}{\sqrt{1-p^2}} \arcsin \sqrt{1-p^2}\right) = 1.$$

При $p \rightarrow 1$ из (3.11) и (3.12) получим

$$B = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{2}{\pi} \frac{\arcsin \sqrt{1-p^2}}{\sqrt{1-p^2}} = \frac{2}{\pi} = 0,6366;$$

$$A = \lim_{p \rightarrow 1} \exp\left(-\frac{p}{\sqrt{1-p^2}} \arcsin \sqrt{1-p^2}\right) = e^{-1} = 0,3679.$$

Для случая $\delta > \omega_0 (p > 1)$ находим

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dB} &= \frac{(-\pi p / 2) \exp(-\pi B p / 2)}{2\sqrt{p^2-1}} [\exp(\pi B \sqrt{p^2-1} / 2) - \\ &\quad - \exp(-\pi B \sqrt{p^2-1} / 2)] + \frac{\exp(-\pi B p / 2)}{2\sqrt{p^2-1}} \times \\ &\times \left[\frac{\pi \sqrt{p^2-1} \exp(\pi B \sqrt{p^2-1} / 2)}{2} + \frac{\pi \sqrt{p^2-1} \exp(-\pi B \sqrt{p^2-1} / 2)}{2} \right] = \\ &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$B = \frac{2 \ln(p + \sqrt{p^2-1})}{\pi \sqrt{p^2-1}}. \quad (3.13)$$

Из (3.13) и (3.10) получаем

$$A = \frac{i}{I_0} = (p + \sqrt{p^2-1})^{-\frac{p}{\sqrt{p^2-1}}}. \quad (3.14)$$

Для $p \rightarrow \infty$ имеем

$$B = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{2 \ln(p + \sqrt{p^2-1})}{\pi \sqrt{p^2-1}} = 0;$$

$$A = \lim_{p \rightarrow \infty} (p + \sqrt{p^2-1})^{-\frac{p}{\sqrt{p^2-1}}} = 0.$$

Таким образом, можно построить таблицу значений A и B в зависимости от параметра p . При $p=0$ значения $B=$

$=1, A=1$; при $0 < p < 1$ величина B вычисляется по (3.11), A — по (3.12); при $p=1$ имеем $B=2/\pi=0,6366, A=1/e=0,3679$; при $1 < p < \infty$ величина B вычисляется по (3.13), A — по (3.14).

В табл. 3.1 приведены расчетные значения A и B , а также их произведение в зависимости от параметра p . По данным табл. 3.1 и экспериментально снятой кривой тока (по его амплитудному значению и времени до амплитуды) можно легко определить параметры RLC -цепи.

Таблица 3.1

p	A	B	AB	p	A	B	AB
0	1	1	1	1,45	0,2821	0,5555	0,1567
0,05	0,967	0,9693	0,8983	1,50	0,2749	0,5480	0,1506
0,10	0,8626	0,9409	0,8116	1,55	0,2681	0,5407	0,1450
0,15	0,8062	0,9145	0,7373	1,60	0,2615	0,5336	0,1395
0,20	0,7561	0,8898	0,6728	1,65	0,2553	0,5268	0,1345
0,25	0,7115	0,8666	0,6166	1,70	0,2493	0,5201	0,1297
0,30	0,6715	0,8449	0,5674	1,75	0,2436	0,5137	0,1251
0,35	0,6355	0,8246	0,5240	1,80	0,2382	0,5074	0,1209
0,40	0,6029	0,8052	0,4855	1,85	0,2330	0,5013	0,1168
0,45	0,5733	0,7870	0,4512	1,90	0,2280	0,4954	0,1130
0,50	0,5463	0,7698	0,4210	1,95	0,2232	0,4896	0,1093
0,55	0,5216	0,7534	0,3930	2,0	0,2186	0,4840	0,1058
0,60	0,4988	0,7379	0,3681	2,5	0,1810	0,4353	0,0788
0,65	0,4779	0,7231	0,3456	3,0	0,1542	0,3967	0,0612
0,70	0,4586	0,7090	0,3251	3,5	0,1342	0,3653	0,0490
0,75	0,4407	0,6956	0,3066	4,0	0,1187	0,3392	0,0403
0,80	0,4240	0,6828	0,2895	4,5	0,1064	0,3170	0,0337
0,85	0,4085	0,6705	0,2739	5,0	0,0964	0,2979	0,0287
0,90	0,3941	0,6587	0,2596	5,5	0,0880	0,2813	0,0248
0,95	0,3805	0,6474	0,2463	6,0	0,0810	0,2666	0,0216
1,00	0,3679	0,6366	0,2342	6,5	0,0750	0,2536	0,0190
1,05	0,3560	0,6262	0,2229	7,0	0,0699	0,2420	0,0169
1,10	0,3448	0,6162	0,2125	7,5	0,0654	0,2315	0,0151
1,15	0,3343	0,6066	0,2028	8,0	0,0614	0,2221	0,0136
1,20	0,3243	0,5973	0,1937	8,5	0,0579	0,2134	0,0124
1,25	0,3150	0,5883	0,1853	9,0	0,0547	0,2055	0,0112
1,30	0,3061	0,5797	0,1774	9,5	0,0519	0,1982	0,0103
1,35	0,2977	0,5714	0,1701	10	0,0494	0,1915	0,0095
1,40	0,2897	0,5633	0,1632	15	0,0331	0,1446	0,0048

Обычно в КМ известна емкость батареи конденсаторов и неизвестны индуктивность и активное сопротивление контура. В этом случае, используя выражения

$$B = 4t/T_0 = 2t/(\pi \sqrt{LC}); \quad A = i/I_0 = (i/U_{c0}) \sqrt{L/C} \quad (3.15)$$

и их произведение

$$AB = 2ti/(\pi U_{c0} C), \quad (3.16)$$

находим из табл. 3.1 по AB параметр p и значения A и B . Затем, подставляя найденные A и B в (3.15), рассчитываем

$$L = 4t^2/(\pi^2 B^2 C) \quad \text{или} \quad L = A^2 U_{c0}^2 C / i^2. \quad (3.17)$$

Определив значение L , из формулы (3.5) находим искомое активное сопротивление контура:

$$R = 2p \sqrt{L/C}. \quad (3.18)$$

Пример расчета. Определить индуктивность и активное сопротивление контура при заданном импульсе разрядного тока для машины МТК-5001, если известно, что емкость батареи конденсаторов $C = 115\,000$ мкФ, начальное напряжение на батарее $U_{c0} = 380$ В, коэффициент трансформации сварочного трансформатора $n = 74$. Из осциллограммы разрядного тока при коротком замыкании контура известно также, что амплитудное значение первичного тока и время до амплитуды соответственно равны $I_{1a} = 793$ А; $T_{1a} = 0,028$ с.

По (3.16) вычисляем

$$AB = \frac{2T_{1a} I_{1a}}{\pi U_{c0} C} = \frac{2 \cdot 0,028 \cdot 793}{3,14 \cdot 380 \cdot 0,115} = 0,3236.$$

По табл. 3.1, применяя экстраполяцию, находим $A = 0,4571$; $p = 0,7037$. Рассчитываем индуктивность контура по (3.17), а затем активное сопротивление контура — по (3.18) (оба значения приведены к первичному контуру и обозначаются соответственно L' и R'):

$$L' = \frac{A^2 U_{c0}^2 C}{I_{1a}^2} = \frac{0,4571^2 \cdot 380^2 \cdot 0,115}{793^2} = 0,0055 \text{ Гн};$$

$$R' = 2p \sqrt{\frac{L'}{C}} = 2 \cdot 0,7037 \sqrt{\frac{0,0055}{0,115}} = 0,3068 \text{ Ом}.$$

Приведем параметры ко вторичному контуру, учитывая, что

$$L'' = L'/n^2 \quad \text{и} \quad R'' = R'/n^2.$$

Тогда

$$L'' = \frac{0,0055}{74^2} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; \quad R'' = \frac{0,3068}{74^2} = 56,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

В практике, особенно для вновь изготовленных и находящихся в длительной эксплуатации КМ с электролитическими конденсаторами, необходимо измерять емкость C батареи конденсаторов. Это связано в первую очередь с большими допустимыми отклонениями по емкости конденсаторов (до $+50\%$) при изготовлении и с выходом из строя отдельных конденсаторов и плавких предохранителей при эксплуатации. Наиболее простым методом определения емкости C является метод обсчета экспоненты разряда на известное сопротивление. В этом случае разряд описывается формулой

$$u_c = U_{c0} e^{-t/\tau}, \quad (3.19)$$

где u_c и U_{c0} — соответственно текущее и начальное напряжения на конденсаторах; τ — постоянная времени, равная $R_6 C$, где R_6 — балластное сопротивление. После несложных преобразований выражение (3.19) приведем к виду, позволяющему найти емкость:

$$C = -\frac{t}{R_6 \ln(u_c/U_{c0})}. \quad (3.20)$$

Используя экспоненту разряда и зная U_{c0} , можно легко определить u_c для любого удобного значения времени t . Подставив все известные значения в (3.20), можно определить емкость батареи конденсаторов с достаточной для практики точностью. Вычисления еще более упрощаются, если учесть, что в момент $t=\tau$ имеет место соотношение $u_c/U_{c0}=0,368$. Используя последнее, по экспоненте разряда легко определить τ , а с ней и емкость конденсаторной батареи.

3.2. Расчет батареи конденсаторов и сварочного трансформатора по заданному импульсу сварочного тока

При эксплуатации КМ на предприятиях иногда появляется необходимость некоторой переделки машины с целью приспособления ее для сварки нового изделия или даже изготовления новой специальной машины собственными силами. При этом возникают, например, вопросы: в какой мере можно увеличить мощность (запасаемую энергию) машины и какие переделки разрядной цепи, включая сварочный трансформатор, это вызовет; можно ли использовать в данной КМ сварочный трансформатор от машины другого типа и т. д. Эти вопросы поможет решить рассматриваемый ниже инженерный метод расчета батареи конденсаторов и сварочного трансформатора по заданному из технологических соображений импульсу сварочного тока.

Существуют различные методы расчета батарей конденсаторов и сварочных трансформаторов КМ, при которых исходят из требуемого для сварки количества энергии. Во ВНИИЭСО разработан и в течение многих лет успешно применяется метод расчета КМ на заданный импульс сварочного тока. Этот метод наиболее целесообразен, так как учитывает весьма важное технологическое требование об определенном распределении энергии во времени, задаваемом исходным импульсом сварочного тока. Метод является сравнительно простым и обеспечивает достаточную для

практики точность результатов. При разработке указанного метода расчета были приняты те же допущения, что и в других известных работах по анализу электромагнитных процессов в разрядной цепи КМ: магнитная проницаемость магнитопровода сварочного трансформатора и, следовательно, сопротивление, индуктивность рассеяния и взаимная индуктивность считались постоянными в процессе разряда конденсаторов. Кроме того, при анализе процесса разряда не учитывался намагничивающий ток i_μ , что значительно упростило расчет.

В магнитопроводе типичного сварочного трансформатора КМ, не имеющем воздушного зазора и перемагничиваемом в каждом цикле за счет изменения направления токов в обмотках, максимальная индукция не превышает значения 2,3 Тл (в том числе остаточная индукция 0,6 Тл). При этом условии ток i_μ составляет не более 5% первичного (разрядного) тока i_1 в момент достижения последним максимального значения. Доля тока i_μ относительно и абсолютно возрастает лишь на последней стадии основной полуволны тока i_1 , т. е. уже после завершения формирования сварочного соединения в процессе сварки. Таким образом, током i_μ практически можно пренебречь ввиду незначительного его влияния на фронт импульса тока i_1 , т. е. на амплитудное значение тока I_{1a} и время его нарастания до амплитуды T_{1a} .

При указанных выше допущениях, т. е. при рассмотрении разрядной цепи КМ как линейной системы, уравнение процесса разряда конденсаторов имеет вид:

$$\frac{1}{C''_n} \int i_2 dt + L'' \frac{di_2}{dt} + R'' i_2 = 0, \quad (3.21)$$

где C''_n — емкость батареи конденсаторов; L'' — индуктивность рассеяния и R'' — активное сопротивление разрядной цепи машины; i_2 — вторичный ток; двумя штрихами здесь и далее обозначены величины, приведенные по вторичному контуру машины. При колебательном разряде, имеющем место практически в большинстве КМ, решения уравнений для вторичного тока i_2 и напряжения на конденсаторах u_c принимают вид

$$i_2 = \frac{U''_{c0}}{\omega L''} e^{-\delta t} \sin \omega t; \quad u_c = \frac{U''_{c0}}{\sin \gamma} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \gamma), \quad (3.22; 3.23)$$

где U''_{c0} — начальное (максимальное) напряжение на конденсаторах; δ — коэффициент затухания процесса разряда; ω — угловая частота собственных колебаний разрядной цепи; $\gamma = \omega T_{2a}$ — параметр, характеризующий процесс разря-

да; T_{2a} — время нарастания вторичного тока до амплитудного значения; $\sin \gamma = \omega \sqrt{L''C''_H}$.

С учетом граничных условий из вышеприведенных уравнений выводятся различные соотношения параметров процесса разряда, из которых выберем те, которые используются при инженерном расчете основных элементов разрядной цепи:

$$\delta = \frac{R''}{2L''}; \quad T_{2a} = \frac{\gamma \operatorname{ctg} \gamma}{\delta}; \quad (3.24; 3.25)$$

$$I_{2a} = \frac{U''c_0}{R''} 2 \cos \gamma \exp(-\gamma \operatorname{ctg} \gamma); \quad \cos \gamma = \delta \sqrt{L''C''_H}; \quad (3.26; 3.27)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L''C''_H} - \delta^2}; \quad \Phi_{\max} = \frac{U''c_0}{\omega} F(\gamma), \quad (3.28; 3.29)$$

где $F(\gamma) = \sin \gamma \{2 \cos \gamma + \exp[-(\pi - \gamma) \operatorname{ctg} \gamma]\}$.

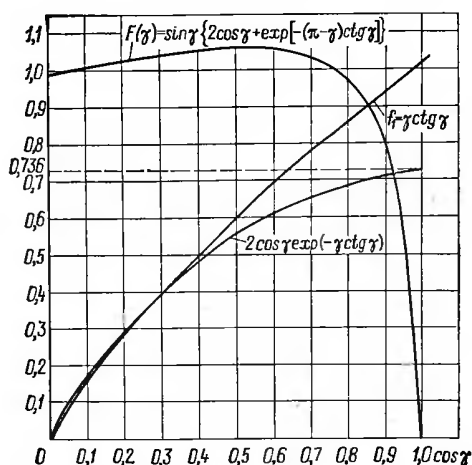


Рис. 3.2. Графики функций от $\cos \gamma$

Выражение (3.29) для максимального магнитного потока Φ_{\max} получено при допущении, что напряжение u_c полностью уравнивается наводимой в первичной обмотке ЭДС. На рис. 3.2 представлены графики некоторых функций от $\cos \gamma$, входящих в вышеприведенные формулы. Использование этих графиков значительно сокращает время расчетов. Исходными данными для расчета являются

амплитудное значение номинального импульса сварочного тока I_{2a} и время его нарастания до амплитуды T_{2a} , параметры машины R'' и L'' , начальное напряжение на конденсаторах U_{c0} и длительность сварочного цикла T_c при заданной производительности машины.

Параметры номинального импульса сварочного тока определяются в зависимости от материала и наибольшей толщины деталей, для сварки которых предназначена проектируемая машина. Эти параметры находятся при отработке исходных режимов сварки на макете или существующей КМ либо рассчитываются методом подобия по данным известных режимов сварки деталей из данного материала другой толщины. Номинальный импульс тока является наибольшим в диапазоне импульсов данной машины и определяет сечения всех токоведущих элементов силовой части и магнитопровода сварочного трансформатора, а также выбор коммутирующих элементов.

Параметры машины R'' и L'' зависят в основном от размеров вылета и раствора сварочного контура, определяемых габаритами свариваемого изделия, и от сечения его элементов. Трудность определения исходных значений R'' и L'' обуславливает необходимость проведения расчета в два этапа. При ориентировочном расчете эти параметры определяются приблизительно путем сравнения проектируемой машины с существующей, имеющей примерно такой же сварочный контур и известные данные опыта короткого замыкания на токе частотой 50 Гц. При этом величина L'' проектируемой машины принимается примерно равной L'' машины-прототипа (зависимость L'' от эквивалентной частоты импульса тока не учитывается). Составляющими параметрами R'' являются активное сопротивление машины $R''_э$ при эквивалентной частоте тока $f_э = 4/T_{2a}$ и сопротивление свариваемых деталей R_d . При низких частотах (6—60 Гц в большинстве КМ) зависимость активного сопротивления от частоты может с приемлемой погрешностью считаться линейной и это сопротивление для проектируемой машины может быть определено интерполированием: $R''_э = R''_{п.т} + (R''_{к.э} - R''_{п.т}) f_э / 50$, где $R''_{п.т}$ и $R''_{к.э}$ — соответственно сопротивления машины-прототипа постоянному току и при коротком замыкании на частоте 50 Гц. Сопротивление R_d может значительно изменяться в процессе сварки, однако ввиду трудности учета этого изменения оно принимается при расчете постоянной величиной. В качестве расчетного может быть выбрано значение в конце процесса сварки. Данные по R_d для различ-

ных материалов и толщин свариваемых деталей приводятся в литературе.

Начальное напряжение U_{c0} определяется после выбора типа конденсаторов для проектируемой машины и, как правило, принимается несколько меньшим, чем номинальное напряжение данного конденсатора. Это обеспечивает некоторый запас по надежности.

Определение исходных данных является наиболее трудоемкой частью расчета разрядной цепи КМ. Собственно расчет элементов цепи не представляет затруднений. Вначале по формуле (3.24) определяют коэффициент затухания δ и затем по формуле (3.25) — величину $\gamma \operatorname{ctg} \gamma$:

$$\gamma \operatorname{ctg} \gamma = \delta T_{2a}. \quad (3.30)$$

Из рис. 3.2 находят значение $\cos \gamma$, соответствующее полученному значению $\gamma \operatorname{ctg} \gamma$. По формуле (3.26) вычисляют вторичное напряжение:

$$U''_{c0} = \frac{I_{2a} R''}{2 \cos \gamma \exp(-\gamma \operatorname{ctg} \gamma)}, \quad (3.31)$$

причем значение знаменателя находят по рис. 3.2. Коэффициент трансформации сварочного трансформатора — первая искомая величина — равен:

$$n = U_{c0} / U''_{c0}. \quad (3.32)$$

С учетом формулы (3.27) определяют вторую искомую величину — требуемую емкость батареи конденсаторов:

$$C_n = C''_n / n^2 = \cos^2 \gamma / (n^2 \delta^2 L''). \quad (3.33)$$

По формуле (3.29) вычисляют максимальный магнитный поток Φ_{\max} в магнитопроводе сварочного трансформатора, причем значения входящих в формулу угловой частоты ω и функции $F(\gamma)$ определяют соответственно по формуле (3.28) и рис. 3.2. Затем находят третью искомую величину — сечение магнитопровода сварочного трансформатора (в квадратных сантиметрах):

$$S = \Phi_{\max} \cdot 10^8 / B_{\max}, \quad (3.34)$$

причем с учетом ранее изложенного принимают $B_{\max} = 2,2$ Тл. Наконец, полагая, что вся запасенная в конденсаторах энергия $W_c = C_n U_{c0}^2 / 2$ будет израсходована на выделение тепла в свариваемых деталях и в токоведущих элементах вторичного контура, определяют длительные вторичный I_{2d} и первичный I_{1d} токи (четвертую и пятую иско-

мые величины):

$$I_{2d} = \sqrt{\frac{W_c}{R'' T_{2a}}}; \quad I_{1d} = 1,1 \frac{I_{2d}}{n}. \quad (3.35; 3.36)$$

При указанном допущении получаются несколько завышенные значения токов и, следовательно, сечений обмоток сварочного трансформатора и элементов сварочного контура. Однако повышенный расход меди является в данном случае оправданным (см. ниже). По полученным данным осуществляется расчет сварочного трансформатора и вторичного контура, который проводится так же, как для других машин контактной сварки [9]. Затем производится уточнение значений параметров R'' и L'' и рассматривается возможность выполнения условия оптимального соотношения параметров:

$$L'' = R'' T_{2a}. \quad (3.37)$$

При оптимальном соотношении параметров заданный импульс тока машины получается при наименьших значениях C_n и Φ_{\max} , т. е. при наименьших затратах на батарею конденсаторов и сварочный трансформатор КМ. Выполнение условия (3.37) практически не всегда возможно, и тогда, принимая допустимыми отклонения C_n и Φ_{\max} в пределах до 5% их минимальных значений, можно принять

$$L'' = (0,7 \dots 1,4) R'' T_{2a}. \quad (3.38)$$

Как правило, соотношение параметров силовой электрической части КМ таково, что $L'' < R'' T_{2a}$. Для выполнения условия (3.38) корректируют полученные значения параметров R'' и L'' , реже — значение параметра T_{2a} . Последний является технологическим параметром, соответствующим оптимальному режиму сварки деталей номинальной толщины, и его значение может корректироваться чаще всего в довольно узком диапазоне. Изменение L'' возможно за счет допустимого изменения размеров сварочного контура или за счет включения в разрядную цепь индуктивного сопротивления. Наиболее целесообразно уменьшение R'' за счет увеличения сечения обмоток сварочного трансформатора и токоподводов, так как это обеспечивает уменьшение емкости батареи конденсаторов. Уменьшение числа сравнительно дорогостоящих конденсаторов вполне окупает дополнительный расход меди. Кроме того, при этом уменьшаются тепловая мощность токоограничительного резистора в зарядной цепи и потери энергии на нем при эксплуатации машины.

Таким образом, увеличение в КМ сечений токоведущих элементов по сравнению с сечениями, определяемыми по наибольшей тепловой нагрузке, является вполне оправданным. При условии, что фактические значения параметров изготовленной в соответствии с расчетом машины (особенно R'' и L'') существенно не отличаются от принятых при расчете, значения параметров фактического номинального импульса тока отличаются от заданных не более чем на 5—7%.

3.3. Особенности режимов работы тиристорov в разрядной цепи и их выбор

Особенностью работы тиристорov в разрядных цепях КМ, где они применяются в качестве коммутатора разрядного тока батареи конденсаторов, подаваемого на сварочный трансформатор, являются большие по амплитуде импульсы тока и длительные паузы между импульсами. Нагрузка на тиристор носит явно выраженный циклический характер.

Экспериментальные исследования показали, что при работе КМ в режиме точечной сварки температура монокристаллической структуры вентиляльного элемента за цикл достигает максимальной Θ_{\max} и успевает вновь достичь начального значения [5]. Измерение температуры основано на снятии характеристики изменения остаточного напряжения Δu на тиристоре при изменении температуры его структуры. Под Δu понимается падение напряжения на тиристоре при прохождении по нему прямого тока. Известно, что с повышением температуры значение Δu уменьшается, причем снижение носит линейный характер. Для испытуемых тиристорov, помещенных в термостат, при прямом токе 0,3 А через них снималась характеристика $\Delta u = f(\Theta)$. Затем испытуемый тиристор включался в разрядную цепь КМ последовательно с рабочим тиристором, коммутирующим разрядный ток. К рабочему тиристору подключалось специальное индуктивно-емкостное устройство гашения, позволяющее произвести его выключение в любой момент при прохождении разрядного тока. Полное выключение производилось за время не более 50 мкс. Через испытуемый тиристор при этом постоянно пропускался измерительный ток 0,3 А от генератора тока. Наблюдение за изменением остаточного напряжения Δu на испытуемом тиристоре при пропуске и после выключения разрядного тока производилось с помощью электронного осциллографа типа С1-8 с памятью.

На рис. 3.3 приведены осциллограммы, полученные при испытании тиристора типа Т-100, показывающие изменение Δu при протекании рабочего тока (осциллограмма сверху) и изменение Δu в процессе остывания структуры (осциллограмма внизу). Измерение Δu начиналось по истечении времени t_1 , в течение которого происходит рассасывание избыточных носителей в базах тиристора. Максимальные отклонения Δu_1 и Δu_2 от значений Δu в холодном состоянии получены при пропуске через тиристор импульсов разрядного тока с амплитудными значениями соответственно 304 и 638 А.

После определения постоянных времени остывания расчетным путем вычислялись отклонения Δu в момент прерывания разрядного тока и соответствующие этим отклонениям значения $\Delta \Theta$. Так, для рассматриваемого случая $\Delta \Theta$ имело максимальные значения 33 и 57 °С соответственно для токов 304 и 638 А. Исследования показали, что отличие фактической температуры от расчетной (рассчитанной с помощью специального метода, приведенного ниже) не превышает 15%.

Перепад температуры $\Delta \Theta$ является важнейшим параметром, определяющим циклоустойкость полупроводниковых вентиляей, и тиристорov в том числе. Циклоустойкость— это среднее число циклов работы до выхода тиристора из строя. Для паяных тиристорov, т. е. для тиристорov с паяным присоединением вентиляльного элемента через вольфрамовую подложку к медному основанию, величина $\Delta \Theta$ связана с числом циклов N формулой

$$N = \frac{c}{D^a \Delta \Theta^k} = \Phi \Delta \Theta^{-k},$$

где D — диаметр вентиляльного элемента; c — постоянная, определяемая экспериментально; a , k — параметрические коэффициенты. Коэффициент $k=2$ при $\Delta \Theta < 69^\circ\text{C}$ и $k=5$

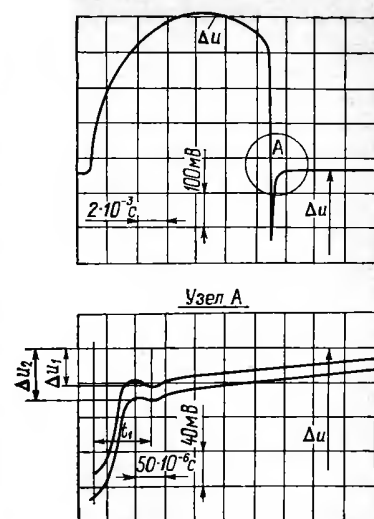


Рис. 3.3. Осциллограммы температурного режима

при $\Delta\theta > 69^\circ\text{C}$; значение Φ приводится в каталожных данных.

Для таблеточных тиристорov, т. е. для тиристорov с прижимным присоединением вентильного элемента к основанию, зависимость N от $\Delta\theta$ задается графически либо таблично. Циклостойкость этих тиристорov за счет отсутствия паяных соединений, в которых при циклической работе возникают существенные пластические деформации припоя, приводящие к его рекристаллизации и разрушению контактов, значительно выше циклостойкости паяных тиристорov.

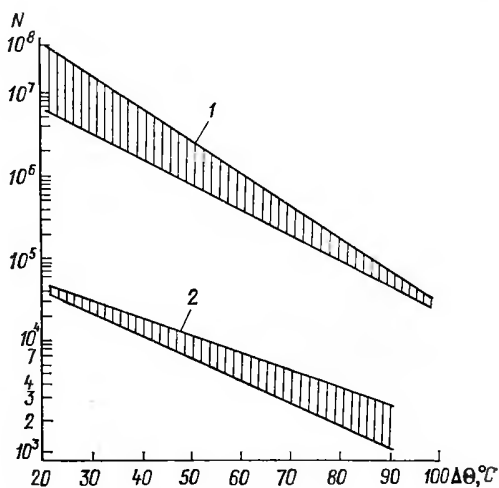


Рис. 3.4. Области зависимости среднего числа циклов N до разрушения от перепада температуры $\Delta\theta$ в процессе циклирования

1 — таблеточные тиристоры Т, ТВ, Т9 на ток 100—800 А; 2 — штыревые тиристоры Т, ТВ, ТС, ТЧ на ток 50—200 А

На рис. 3.4 приведены области зависимости среднего числа циклов N до разрушения от перепада температуры $\Delta\theta$ в процессе циклирования для тиристорov таблеточных и штыревых конструкций. График зависимости построен по справочным и каталожным данным на тиристоры общепромышленного применения. Значения θ_{\max} и $\Delta\theta$, а потом и N могут быть найдены расчетом, путем построения импульсов мощности, воздействующих на тиристор, с последующим определением температуры по принципу суперпо-

зиции. Однако этот метод является поверочным и неудобен при разработке и проектировании. В качестве проектного метода выбора тиристорov удобен метод, использующий параметр W_3 , называемый защитным показателем тиристора. Для тиристорov этот показатель — предельный и одновременно допустимый. При превышении его тиристор разрушается и выходит из строя. Для всех тиристорov значение W_3 приводится в паспортных данных. Оно эквивалентно значению теплового воздействия аварийного тока:

$$W_3 = \int_0^t i dt = I^2 t,$$

где i — ток через тиристор; I — действующий ток синусоидальной формы.

Сформулируем критерий выбора тиристора. Для этого введем понятия интегрального показателя температурной нагрузки тиристора W_T , поправочного коэффициента $k_{\Delta\theta}$ и интегрального показателя сварочной машины W_M . Под W_T понимается такое значение интеграла квадрата тока, которое создает выбранный по условиям циклостойкости перепад температуры вентильного элемента. Коэффициент $k_{\Delta\theta}$ всегда меньше единицы и связывает W_T и W_3 соотношением

$$W_T = k_{\Delta\theta} W_3. \quad (3.39)$$

Значение W_M определяется по формуле

$$W_M = \int_0^t i_p^2 dt, \quad (3.40)$$

где i_p — разрядный ток батареи конденсаторов, проходящий через тиристор на сварочный трансформатор. Тогда критерием для выбора тиристора может служить соотношение

$$W_T \geq W_M. \quad (3.41)$$

На рис. 3.5 приведены схемы разрядных цепей, применяемые в большинстве современных КМ. Для всех трех схем ток через разрядный тиристор VS до момента времени t_1 описывается известным уравнением (3.2) или (3.22) для случая колебательного процесса. Для схемы без шунтирующей цепи это уравнение справедливо до окончания разряда, т. е. до момента времени t_2 ; для схемы с шунтирующим диодом VD ток через тиристор VS прекращается в момент времени t_1 ; для схемы с $R_{ш}$ ток через тиристор

VS в промежутке времени t_1-t_2 описывается уравнением

$$i_{V|t_1-t_2} = I_{V|t_1} \exp \frac{-at}{2} \left(-\frac{a}{2\omega} \sin \omega t + \cos \omega t \right), \quad (3.42)$$

где $a=1/(cR_m)+R'/L'$ — вспомогательный параметр; R' и L' — соответственно активное сопротивление и индуктивность, приведенные к первичной цепи. Остальные обозначения те же, что и в формуле (3.2) или (3.22). Интегральные показатели схем найдем, подставив (3.2) в (3.40) и

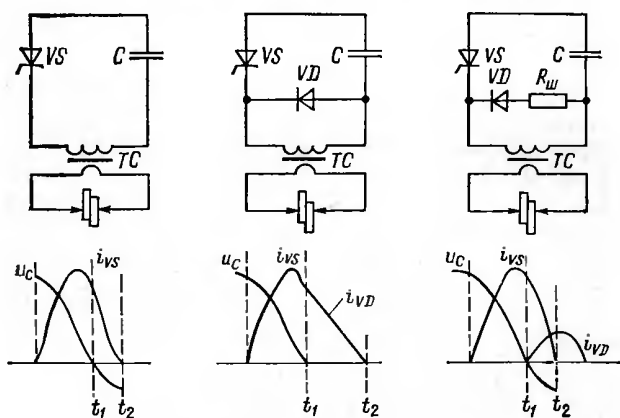


Рис. 3.5. Схемы разрядных цепей

произведя интегрирование. В итоге для схемы без шунтирующей цепи получим

$$W_m = \frac{U_{C0}^2 [1 - \exp(-2\delta\pi/\omega)]}{L'^2 4\delta (\delta^2 + \omega^2)}. \quad (3.43)$$

Для схемы с шунтирующим диодом

$$W_m = \left(\frac{U_{C0}}{2\omega L'} \right)^2 \left\{ \frac{1 - \exp[-2\delta(\pi - q)/\omega]}{\delta} + \frac{(\omega \sin 2q + \delta \cos 2q) \exp[-2\delta(\pi - q)/\omega] - \delta}{\delta^2 + \omega^2} \right\}, \quad (3.44)$$

где $q = \arctg \omega/\delta$ — вспомогательный параметр. Интегральный показатель схемы с шунтирующей цепью из диода и резистора, найденный аналогичным образом, но с учетом (3.42), имеет сложное выражение. Применение этого выражения в инженерной практике затруднительно, поэтому оно здесь не приводится. Для реальных схем можно ре-

комендовать находить этот показатель как среднее арифметическое интегральных показателей первых двух схем.

Чтобы пользоваться критерием (3.41), необходимо знать W_τ , а для этого необходимо определить числовые значения коэффициента $k_{\Delta\Theta}$. Ход действий по отысканию $k_{\Delta\Theta}$ является следующим:

1. Для полуволны тока синусоидальной формы длительностью $10 \cdot 10^{-3}$ с расчетным путем было определено, что максимальное значение температуры Θ_{\max} полупроводникового элемента приходится на время $7,0 \cdot 10^{-3}$ с.

2. Из формул:

$$\Delta\Theta_n = \sum_{i=1}^n \Delta p_i [r_{\tau[n-(i-1)]} - r_{\tau(n-i)}];$$

$$\Delta p_i = \Delta P_{\max} \sin \left(\frac{\pi}{9} i - \frac{\pi}{18} \right),$$

где Δp_i — рассеиваемая мощность i -го участка; $r_{\tau[n-(i-1)]}$ и $r_{\tau(n-i)}$ — переходное тепловое сопротивление соответственно в моменты времени t_n-t_{i-1} и t_n-t_i ; i — индекс текущей координаты (меняется от 1 до n); n — индекс координаты, по которой определяется превышение температуры, находилось значение максимальной мощности, соответствующей задаваемому перепаду температуры $\Delta\Theta$ в момент времени $7,0 \cdot 10^{-3}$ с:

$$\Delta P_{\max} = \frac{\Delta\Theta_7}{\sum_{i=1}^{n=7} \sin \left(\frac{\pi}{9} i - \frac{\pi}{18} \right) (r_{\tau[n-(i-1)]} - r_{\tau(n-i)})}$$

3. По формуле

$$\Delta P_{\max} = I_{\max} (u_0 + R_d I_{\max}),$$

где R_d — динамическое сопротивление тиристора; u_0 — пороговое напряжение, вычислялось значение максимального тока I_{\max} .

4. Интегральный показатель тиристора W_τ , соответствующий задаваемому значению $\Delta\Theta$ и длительности импульса $10 \cdot 10^{-3}$ с, рассчитывался по формуле

$$W_\tau = (I_{\max}/\sqrt{2})^2 0,01.$$

5. Числовые значения коэффициента $k_{\Delta\Theta}$ для каждого конкретного типа тиристора и задаваемого $\Delta\Theta$ определялись через отношение W_τ и W_Δ :

$$k_{\Delta\Theta} = W_\tau / W_\Delta.$$

Таким образом были найдены значения $k_{\Delta\theta}$ в диапазоне $\Delta\theta = 20 \dots 100^\circ\text{C}$ для тиристоров общепромышленного назначения, в том числе для штыревых (паяных) на токи от 50 до 200 А и таблеточных (прижимных) на токи от 100 до 800 А. Значительная разница значений $k_{\Delta\theta}$ не позволяет объединить штыревые и таблеточные тиристоры в одну группу. На рис. 3.6 приведены зависимости $k_{\Delta\theta} = f(\Delta\theta)$ для этих групп тиристоров, полученные как сред-

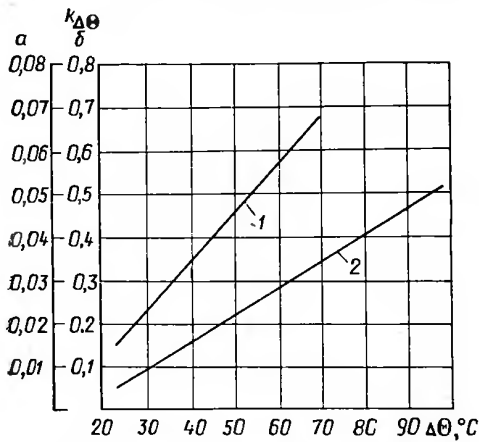


Рис. 3.6. Зависимость $k_{\Delta\theta}$ от $\Delta\theta$

1 — штыревые тиристоры (ордината а); 2 — таблеточные (ордината б)

нее арифметическое расчетных величин $k_{\Delta\theta}$ внутри каждой группы. Погрешность выбора среднего значения $k_{\Delta\theta}$ имеет нормальный закон распределения

$$\Delta = t_{pn} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

где t_{pn} — коэффициент Стьюдента; \bar{x} — среднее арифметическое значение $k_{\Delta\theta}$; x_i — значение $k_{\Delta\theta}$ для определенного тиристора; n — число тиристоров, для которых известно $k_{\Delta\theta}$; Δ — доверительная граница погрешности определения $k_{\Delta\theta}$. Для штыревых тиристоров значение Δ примерно постоянно во всем диапазоне рассматриваемых $\Delta\theta$ и составляет 35%, для таблеточных значение Δ существенно меньше и равно 13%.

Данный метод выбора тиристора путем сравнения его интегрального показателя W_T с интегральным показателем машины W_M может быть применен практически для любой длительности импульса сварочного тока. Однако для дли-

тельностью импульса менее $10 \cdot 10^{-3}$ с следует в формуле (3.39) брать меньшее значение W_3 . Эти значения приводятся в каталожных или паспортных данных на тиристор обычно в виде графика. Во всех остальных случаях нужно пользоваться значением защитного показателя, приводимым в паспортных данных для температуры $+25^\circ\text{C}$.

Пример выбора тиристора. Требуется выбрать тиристор для коммутации разрядного тока в точечной машине на ток 50 кА со следующими параметрами: емкость батареи конденсаторов $C_n = 20\,000$ мкФ, начальное напряжение на батарее $U_{C0} = 950$ В, коэффициент трансформации $n = 200$, индуктивность и активное сопротивление, приведенные ко вторичной цепи, соответственно равны $L'' = 1,0 \cdot 10^{-6}$ Гн и $R'' = 56,0 \cdot 10^{-6}$ Ом, производительность машины 60 св/мин. Схема разрядной цепи машины эквивалентна схеме без шунтирующей цепи на рис. 3.5 с той лишь поправкой, что число циклов для тиристора VS нужно уменьшить вдвое, так как в трансформаторе TC осуществляется реверс сварочного тока дополнительным тиристором, включенным встречно-параллельно тиристоры VS.

Приведем L'' и R'' к первичной цепи:

$$L' = L'' n^2 = 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 = 0,04 \text{ Гн}; \quad R' = R'' n^2 = 56,0 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 = 2,24 \text{ Ом}.$$

Найдем интегральный показатель машины W_M по формуле (3.43):

$$W_M = \frac{U_{C0}^2 [1 - \exp(-2\delta\pi/\omega)]}{L'^2 4\delta (\delta^2 + \omega^2)} = \frac{950^2 [1 - \exp(-2 \cdot 28 \cdot 3,14/22,1)]}{0,04^2 \cdot 4 \cdot 28 (28^2 + 22,1^2)} = 4029 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где

$$\delta = \frac{R'}{2L'} = 28 \text{ с}^{-1}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L'C_n} - \delta^2} = 22,1 \text{ с}^{-1}.$$

С учетом затрат времени на межсварочные операции примем среднечасовую производительность равной 900 св/ч. Поставим условие, что тиристор должен проработать до выхода из строя не менее пяти лет при двухсменной работе. Число разрядных циклов за это время составит $N = 900 \cdot 2000 \cdot 2 \cdot 5 = 18 \cdot 10^6$. По рис. 3.4 определяем, что для тиристора таблеточной конструкции значение $\Delta\theta$ не должно превышать 33°C . По рис. 3.6 найдем соответствующий этому перепаду температуры коэффициент $k_{\Delta\theta}$, равный 0,11. Из выражения (3.39), принимая $W_T = W_M$, найдем защитный показатель тиристора:

$$W_3 = W_T / k_{\Delta\theta} = 4029 / 0,11 = 36\,627 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Учитывая, что класс тиристора по напряжению должен быть не менее 13-го, пользуясь данными [11], найдем, что наиболее подходящим для нашего случая является тиристор типа Т9-100, защитный показатель которого равен $54\,500 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

3.4. Инвертор в разрядной цепи конденсаторных машин

Все большее применение в разрядных цепях КМ находят инверторы на тиристорах. Они заменяют электромеханические контакторы для реверсирования тока в сварочном трансформаторе, применяются в машинах для шовной сварки, а также для регулирования формы и значения сварочного тока.

На рис. 3.7 изображена принципиальная электрическая схема КМ с реверсированием разрядного тока в сварочном трансформаторе TC [1]. Батарея конденсаторов C_n заряжается до напряжения заданного уровня через зарядное устройство V . Разряд батареи C_n на сварочный трансформатор TC производится путем поочередного включения двух пар тиристоров $VS1, VS3$ и $VS2, VS4$. Этим достигается реверсирование разрядного тока в трансформаторе TC , что позволяет избежать намагничивания последнего и благодаря этому использовать сварочный трансформатор

Рис. 3.7. Схема КМ с реверсированием разрядного тока

значительно меньших габаритов, чем при одностороннем разряде. Так как процесс разряда батареи C_n носит колебательный характер, что типично практически для всех КМ, то после момента равенства нулю напряжения на батарее C_n ЭДС самоиндукции начинает перезаряжать последнюю напряжением обратного знака. Для батареи электролитических конденсаторов это недопустимо, и для предотвращения этого применены два шунтирующих тиристора $VS5$ и $VS6$. Если работали тиристоры $VS1$ и $VS3$ и ток в трансформаторе TC протекал в направлении, указанном сплошной стрелкой, то как только обратное напряжение на батарее C_n достигнет нескольких вольт, включится тиристор $VS5$, так как к его управляющему электроду относительно катода прикладывается положительное напряжение. Тиристор $VS5$ шунтирует на себя весь ток, обуслов-

ленный ЭДС самоиндукции; при этом тиристоры $VS1$ и $VS3$ сразу же выключаются. Аналогично работает и шунтирующий тиристор $VS6$, когда в следующем цикле разрядный ток включают тиристоры $VS2$ и $VS4$. Диод VD предотвращает возникновение обратного напряжения на управляющих переходах тиристоров $VS5$ и $VS6$, резистор R ограничивает ток управления. Схема обеспечивает надежное выключение тиристоров $VS1—VS4$ инвертора, что позволяет сразу же после их выключения производить заряд батареи конденсаторов C_n , и надежно предохраняет электролитические конденсаторы от перезаряда обратным напряжением.

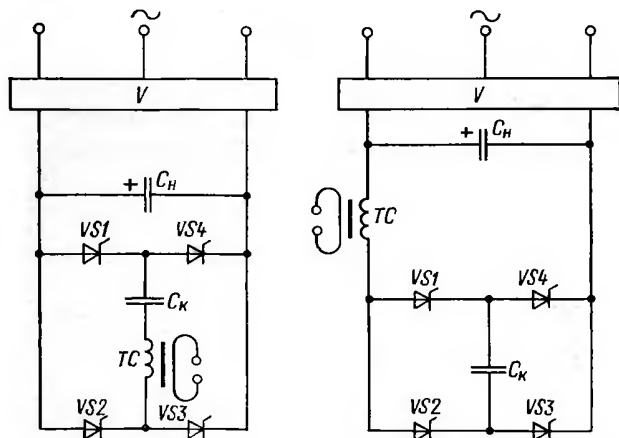


Рис. 3.8. Схемы шовных КМ с последовательным инвертором

Практическое применение инверторы мостового типа с включением коммутирующего конденсатора последовательно с нагрузкой, так называемые последовательные инверторы, нашли в КМ для шовной сварки [6]. В ИЭС имени Е. О. Патона разработана схема КМ (рис. 3.8), позволяющая получать как однополярные, так и разнополярные импульсы сварочного тока, обеспечивающая жесткие режимы сварки и равномерно потребляющая энергию из сети. Машина содержит выпрямительное устройство V , накопительную батарею электролитических конденсаторов C_n и последовательный мостовой инвертор на тиристорах $VS1—VS4$ и коммутирующих конденсаторах C_k , нагрузкой которого служит сварочный трансформатор TC . В одной

схеме трансформатор TC включен в диагональ инвертора и в нем возбуждаются импульсы переменного тока или разнополярные импульсы, в другой трансформатор TC включен до инвертора на стороне постоянного тока и в нем возбуждаются однополярные импульсы тока. Машина работает следующим образом.

Накопительная батарея C_n заряжается от выпрямителя V . При попеременном включении диаметрально расположенных тиристоров коммутирующий конденсатор C_k перезаряжается через сварочный трансформатор TC импульсами тока, являющимися одновременно сварочными, причем конденсатор C_k способствует процессу перезаряда. Для нормальной работы схемы процесс перезаряда конденсатора C_k должен носить колебательный характер, при котором тиристоры $VS1$, $VS3$ и $VS2$, $VS4$ выключаются при первом же прохождении тока через нуль, пропуская лишь одну полуволну тока. Следовательно, длительность сварочного импульса определяется полупериодом собственных колебаний контура и не зависит от частоты управляющих импульсов, включающих тиристоры. Напряжение на конденсаторе C_k через несколько полупериодов достигает резонансного значения, которое превышает напряжение на батарее C_n . Для расчета сварочной цепи и выбора режима сварки выведем формулы, определяющие установившееся значение напряжения U_{C_k} на конденсаторе C_k и амплитудное значение сварочного тока I_{2a} во вторичной обмотке сварочного трансформатора. Мгновенный ток в сварочной цепи описывается формулой

$$i_2(t) = \frac{U_{C_n} + U_{C_k}(0)}{n\omega L''_{\Sigma}} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (3.45)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{n^2 L''_{\Sigma} C} - \left(\frac{R''_{\Sigma}}{2L''_{\Sigma}}\right)^2}; \quad C = \frac{C_n C_k}{C_n + C_k}; \quad \delta = \frac{R''_{\Sigma}}{2L''_{\Sigma}};$$

$$L''_{\Sigma} = \frac{L'}{n^2} + L''; \quad R''_{\Sigma} = \frac{R'}{n^2} + R'' + R_d;$$

U_{C_n} — напряжение на накопительной батарее конденсаторов C_n ;

U_{C_k} — напряжение на конденсаторе C_k во время паузы между импульсами сварочного тока;

L' и L'' — соответственно индуктивность рассеяния первичного и вторичного контуров сварочной цепи; R' и R'' — соответствен-

но активные сопротивления первичного и вторичного контуров сварочной цепи; R_d — сопротивление свариваемых деталей; n — коэффициент трансформации трансформатора TC .

Мгновенное напряжение на конденсаторе $u_{C_k}(t)$ выражается формулой

$$u_{C_k}(t) = U_{C_k}(0) - \frac{1}{C_k} \int_0^t i_2(t) dt = U_{C_k}(0) - [U_{C_n} + U_{C_k}(0)] \frac{C_n}{C_n + C_k} \left[1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t \right) \right]. \quad (3.46)$$

В формулах (3.45) и (3.46) время t отсчитывается от начала очередного импульса тока. Так как сварочный ток проходит через нуль в момент $t_{св} = \pi/\omega$, то при установившемся резонансном режиме $U_{C_k}(t_{св}) = U_{C_k}$. Учитывая, что

при этом $U_{C_k}(0) = -U_{C_k}$, и подставляя это значение в уравнение (3.46), после несложных преобразований получим

$$U_{C_k} = \frac{U_{C_n} (1 + e^{-\pi/\eta})}{2 \frac{C_n}{C_k} + (1 - e^{-\pi/\eta})}, \quad (3.47)$$

$$\text{где } \eta = \sqrt{\frac{4L''_{\Sigma}}{n^2 R''_{\Sigma} C} - 1}.$$

Если учесть, что на практике, как правило, имеет место соотношение $C_n \gg C_k$, то формула (3.47) значительно упрощается:

$$U_{C_k} = U_{C_n} \operatorname{cth} \frac{\pi}{2\eta}. \quad (3.48)$$

При этом выражение для амплитуды сварочного тока будет

$$I_{2a} = U_{C_n} \left(1 + \operatorname{cth} \frac{\pi}{2\eta} \right) \sqrt{\frac{C}{L''_{\Sigma}}} e^{-\frac{1}{\eta} \operatorname{arctg} \eta} \quad (3.49)$$

Пользуясь формулами (3.47) — (3.49), можно рассчитать параметры разрядного контура шовной машины, обеспечивающие нужный режим сварки. Рассмотренные схемы позволяют плавно регулировать режим сварки, отличаются простотой и достаточной надежностью. По сравнению

с традиционными схемами шовных КМ, частота сварочных импульсов которых ограничена частотой сети, в схемах с последовательным инвертором верхняя допустимая частота следования сварочных импульсов значительно выше. К достоинствам схемы следует отнести также постепенное нарастание импульсов сварочного тока в начале цикла; такая амплитудная модуляция получается без каких-либо специальных мер, за счет особенности протекания переходного процесса в схеме инвертора. Можно отметить также, что данные схемы могут быть использованы для точечной сварки пачкой импульсов на повышенной частоте, для чего необходимо иметь лишь задатчик длительности серии сварочных импульсов.

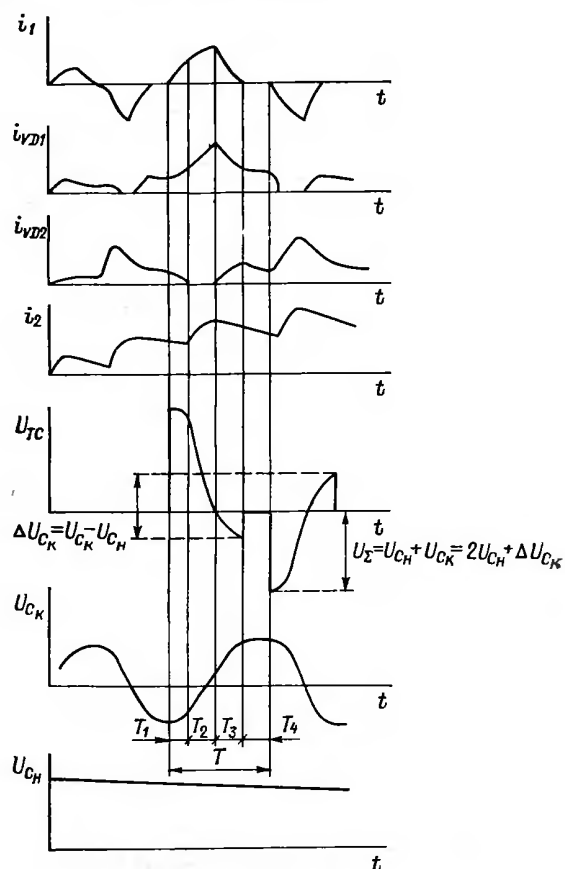


Рис. 3.9. Графики токов и напряжений

Схемы с применением последовательных инверторов находят все более широкое применение для регулирования формы и значения сварочного тока. Хорошими возможностями для этого обладает уже упомянутая в первой главе схема (см. рис. 1.10, б). Работа ее напоминает работу рассмотренной схемы (рис. 3.8), однако за счет наличия выпрямителя на вторичной стороне сварочного трансформатора характер протекания электромагнитных процессов в ней имеет свои особенности [7]. Работа схемы периодична. Периодом T является время между поочередными включениями тиристоров $VS1, VS3$ и $VS2, VS4$. Импульс вторичного тока i_2 состоит из множества таких периодов; в свою очередь, каждый период состоит из четырех этапов T_1, T_2, T_3, T_4 (рис. 3.9).

Рассмотрим работу схемы на первом этапе, с момента включения очередной пары тиристоров, например $VS2$ и $VS4$. Примем в общем случае, что перед этим в сварочной цепи проходит ток i_2 , который равномерно распределен по диодам $VD1$ и $VD2$ и двум виткам вторичной обмотки сварочного трансформатора TC . Наличие этого тока обуславливается запасенной в индуктивности сварочного контура энергией. Ток на первичной обмотке трансформатора при этом отсутствует, так как магнитные потоки в магнитопроводе трансформатора от равных по значению токов, протекающих через диоды $VD1$ и $VD2$ в разные стороны, также равны, направлены в противоположные стороны и поэтому взаимно компенсируют друг друга. При включении тиристоров $VS2$ и $VS4$ в первичной обмотке трансформатора TC появляется ток под действием суммарного напряжения на накопительном C_n и коммутирующем C_k конденсаторах. Во вторичной цепи TC начинается коммутация тока, переход тока в цепь одного из диодов, например VD . Первый этап, или этап начальной коммутации, заканчивается, когда ток полностью переходит в цепь диода $VD1$ и прекращается в цепи диода $VD2$.

Начинается второй этап, межкоммутационный, когда ток в цепи проводящего диода нарастает до максимального значения и затем начинает спадать. Коммутирующий конденсатор C_k , имеющий значительно меньшую емкость, чем накопительная батарея конденсаторов C_n , перезаряжается током i_1 на обратную полярность до напряжения, несколько превышающего напряжение на накопительном конденсаторе. При этом на запертом диоде $VD2$ появляется напряжение прямой полярности, и, когда оно достигает порогового значения, диод $VD2$ включается. В этот момент начинается третий этап, этап конечной коммутации, в те-

чение которого вторичный ток i_2 за счет энергии, накопленной в индуктивности сварочного контура, равномерно распределяется по двум виткам вторичной обмотки трансформатора TC и диодам $VD1$ и $VD2$. Ток i_1 спадает до нуля. Затем следует четвертый этап — пауза между выключением одной пары тиристоров и включением другой.

Вторичный ток i_2 нарастает только на межкоммутационном этапе, на других этапах спадает по экспоненте. Электромагнитные процессы на каждом из этапов описываются характерной для данного этапа системой линейных

ного тока i_2 уменьшается от 47 до 15 кА, а его пульсация увеличивается от 1,5 до 41,0%. Увеличение коммутирующей емкости C_k от 100 до 500 мкФ приводит к уменьшению частоты f_2 пульсаций вторичного тока и напряжения u_k на коммутирующем конденсаторе C_k в два раза, максимальное же значение вторичного тока I_{2max} увеличивается весьма незначительно.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМИ КОНДЕНСАТОРНЫМИ МАШИНАМИ

4.1. Система автоматической стабилизации напряжения на батарее конденсаторов

Качество сварки на КМ в первую очередь зависит от стабильности напряжения на батарее конденсаторов. Рассматриваемая в этом параграфе система автоматической стабилизации напряжения (САСН) применяется во всех КМ средней и большой мощности, выпускаемых серийно заводами «Электрик» им. Н. М. Шверника и ПЗТЭСО (МТК-5001, МТК-8004, ПРК-4001, ПРК-12001). САСН обеспечивает заряд батареи конденсаторов и стабилизацию напряжений на ней с точностью $\pm 1\%$ заданного значения при колебаниях сетевого напряжения в пределах $-15 \dots +10\%$, причем точность сохраняется во всем диапазоне изменений запасаемой в конденсаторах энергии. Этот диапазон может достигать 20, но при этом минимальное время заряда батарей конденсаторов должно быть не менее 0,06 с. Ограничение времени заряда связано с ограниченным быстродействием САСН. При временах заряда, меньших 0,06 с, происходит перезаряд батарей конденсаторов, что недопустимо, так как из-за малых токов утечки напряжение станет равным заданному только через большой промежуток времени.

САСН представляет собой статическую систему с принципом управления по отклонению. На рис. 4.1 приведены функционально-структурная и принципиальная схемы САСН. На функционально-структурной схеме видно, что система охвачена отрицательной обратной связью по напряжению на батарее конденсаторов $БК$. Сигнал рассогласования ΔU , равный разности сигнала задания U_z с источника задающего напряжения $ИЗН$ и сигнала обратной связи, усиливается в промежуточном усилителе $ПУ$ и поступает на вход формирователя импульсов $ФИ$. Последний работает по вертикальному принципу, формируя импульс по фазе в зависимости от значения сигнала $U_{вых}$ с выхода $ПУ$. В режиме заряда батареи конденсаторов $БК$ сигнал ΔU вводит усилитель $ПУ$ в режим насыщения, при этом $U_{вых}$ максимально и фаза импульсов с выхода $ФИ$ постоянна. Угол включения тиристоров управляемого выпрямительного устройства $УВУ$ остается постоянным, пока $\Delta U \geq 1$ В. При $\Delta U < 1$ В усилитель $ПУ$ выходит из режима насыщения, импульсы управления перемещаются относительно полуволны сетевого напряжения вправо и угол включения тиристоров устанавливается таким, при котором $БК$ подзарядается через $УВУ$ в каждую полуволну выпрямленного напряжения.

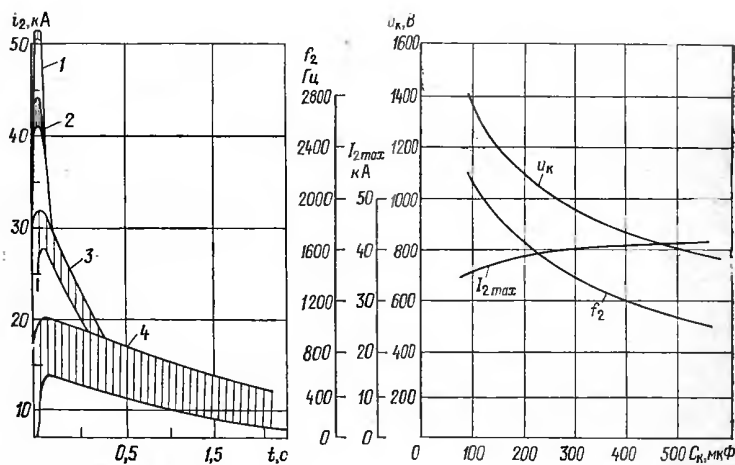


Рис. 3.10. Зависимость вторичного тока от паузы между импульсами первичного тока и зависимость I_{2max} , f_2 и u_k от C_k

1 — пауза 100 мкс, пульсация 1,5%; 2 — пауза 400 мкс, пульсация 5,1%; 3 — пауза 1600 мкс, пульсация 12,8%; 4 — пауза 6400 мкс, пульсация 41%

дифференциальных уравнений. Здесь отметим лишь, что первичный i_1 и вторичный i_2 токи связаны типовым соотношением для КМ $i_2 = i_1 n$, где n — коэффициент трансформации только на втором, межкоммутационном, этапе.

На рис. 3.10 приведены зависимости некоторых параметров для экспериментальной установки МТКВ-5001, находящейся в промышленной эксплуатации. Основные параметры установки, при которых снимались характеристики, следующие: $C_n = 400\,000$ мкФ, $C_k = 500$ мкФ, $U_{CO} = 400$ В, $L'' = 2,0 \cdot 10^{-6}$ Гн, $L_k = 0,3 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R'' = 23 \cdot 10^{-6}$ Ом, $n = 30$. Видно, что с увеличением паузы между импульсами первичного тока от 100 до 6400 мкс амплитуда вторич-

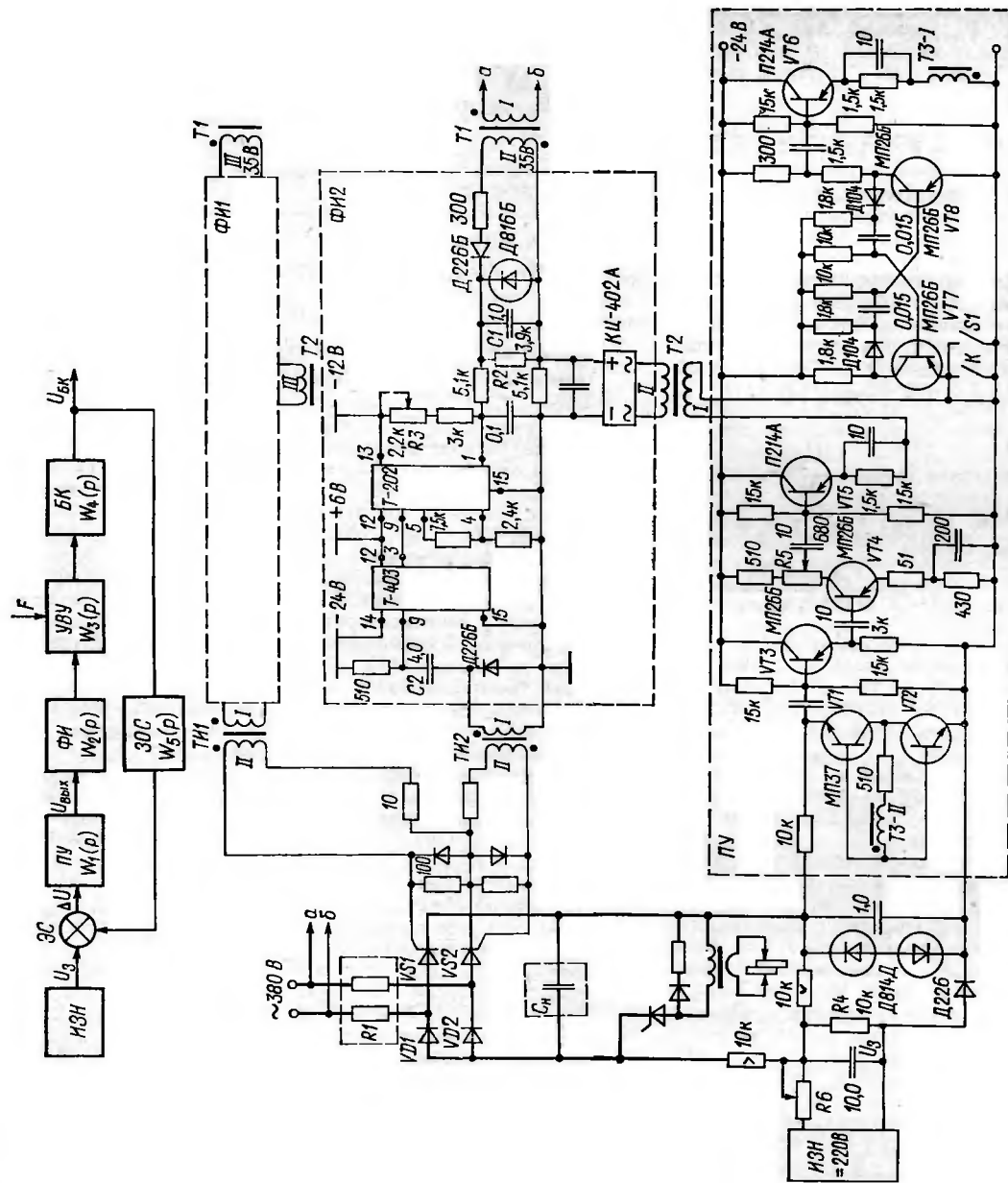


Рис. 4.1. Функционально-структурная и принципиальная схемы САСН

Статический расчет САСН сводится к вычислению статического коэффициента передачи системы, необходимого для получения заданной точности. На рис. 4.1 стрелкой, обозначенной буквой F , изображено внешнее возмущение — колебание сетевого напряжения, действующее на устройство УВУ. Передаточная функция замкнутой системы по возмущению имеет вид

$$\Phi(p) = \frac{W_3(p) W_4(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_3(p) W_4(p) W_5(p)},$$

где в числителе и знаменателе записаны передаточные функций соответствующих звеньев функционально-структурной схемы САСН.

При малых приращениях звенья $\Phi И$ и УВУ можно считать линейными с передаточными функциями $W_2(p) = k_2$ в градусах на вольт и $W_3(p) = k_3$ в вольтах на градус. Усилитель ПУ и звено обратной связи ЗОС представляют собой пропорциональные звенья, и поэтому их передаточные функции запишутся как k_1 и k_5 соответственно. При $p=0$ получаем уравнение статики, при этом и передаточная функция $W_4(p)$ запишется в виде коэффициента k_4 . При заданной точности поддержания напряжения на батарее БК, равной 1% ($\Delta U_{БК} = 1\%$), и значении возмущения $\Delta F = 25\%$

$$\Phi(0) = \frac{\Delta U_{БК}}{\Delta F} = 0,04.$$

При $k_2 = 10 \dots /В$, $k_3 = 8В/\dots$, $k_4 = 1$, $k_5 = 0,5$ (значения для рассматриваемой здесь схемы САСН)

$$k_1 = \frac{k_3 k_4 - \Phi(0)}{\Phi(0) k_2 k_3 k_4 k_5} = 5.$$

В итоге получим, что коэффициент усиления промежуточного усилителя ПУ для реализации заданной точности должен быть равен пяти ($k_1 = 5$). Пульсация напряжения, связанная с подзарядом БК в каждую половину выпрямленного напряжения, составляет сотые доли процента и практически не сказывается на общей стабильности напряжения на БК.

Рассмотрим работу САСН по принципиальной электрической схеме. Силовой регулятор собран по мостовой схеме на диодах $VD1, VD2$ и тиристорах $VS1, VS2$. Резистор $R1$ служит для ограничения значения зарядного тока. Тиристоры $VS1$ и $VS2$ включаются импульсами соответственно от однотипных формирователей импульсов $\Phi И1$ и $\Phi И2$. Противоположным включением обмоток трансформатора $T1$ достигается сдвиг по фазе импульсов управления на 180° эл. Трансформатор $T1$ входит в состав источника пилообразного напряжения («пилы»). «Пила» формируется при разряде конденсатора $C1$ на резистор $R2$, причем окончание разряда совпадает с окончанием периода сетевого напряжения. «Пила» сравнивается на входе элемента Т-202, являющегося пороговым, с сигналом управления — напряжением $U_{вых}$ с усилителя ПУ. Напряжение $U_{вых}$ отпирает входной каскад элемента Т-202, «пила» запирает его. При включенном заряде, т. е. при $U_{вых} = 0$, входной каскад элемента Т-202 должен быть закрыт и на выходе 9 элемента Т-202 должен быть постоянный «0». («0» и «1» в логических схемах означают соответственно отсутствие и присутствие сигналов на входе и выходе.) Исходный «0», или рабочая точка элемента Т-202, устанавливается резистором $R3$. При появлении напряжения $U_{вых}$ и в момент превышения им уровня «пилы» входной каскад элемента Т-202 отпирается и на его выходе 9 появляется «1». Чем больше значение $U_{вых}$, тем раньше относительно полупери-

ода сетевого напряжения срабатывает элемент Т-202 и тем левее сдвигнут импульс, формируемый в импульсном устройстве, собранном на элементе Т-403, относительно полупериода напряжения сети. Импульс управления формируется при разряде конденсатора $C2$ на импульсный трансформатор $ТИ2$ через включенный выходной каскад усилителя Т-403. Это позволяет исключить импульсное потребление тока по цепям питания и связанные с этим помехи.

Промежуточный усилитель ПУ является усилителем постоянного тока и усиливает сигнал рассогласования, равный $U_c - U_c/2$. Деление сигнала обратной связи U_c на два связано с трудностью изготовления источника задающего напряжения $ИЗН$ на 400 В, максимального для применяемых электролитических конденсаторов. Чтобы избежать подстроек ПУ в работе, которые неизбежны, если применить усилитель постоянного тока с гальваническими связями, и повысить стабильность, усилитель ПУ собран по схеме модулятор—усилитель переменного тока — выпрямитель. Кроме того, такая схема позволяет получить гальваническую развязку ПУ от логических элементов, общий вывод которых с целью повышения помехоустойчивости заземляется. Заземлять же усилитель ПУ, связанный по цепи обратной связи с питающей электросетью, нельзя. Модулятор собран на транзисторах $VT1, VT2$, включенных инверсно для уменьшения остаточных напряжений. Усилитель переменного тока собран на транзисторах $VT3, VT4, VT5$. Первый и последний каскады усилителя представляют собой эмиттерные повторители, средний каскад на транзисторе $VT4$ является усилительным. Несущая частота 5 кГц выбрана из условий точности и быстрей действия. Она вырабатывается генератором несущей частоты на транзисторах $VT6, VT7, VT8$, представляющим собой мультивибратор с корректирующими диодами. Мультивибратор запускается с помощью контакта реле K , одновременно начинает работать вся САСН. Прямоугольные сигналы с частотой 5 кГц с выхода мультивибратора (с трансформатора $T3$) поступают на вход модулятора, и транзисторы $VT1$ и $VT2$ преобразовывают сигнал рассогласования в сигнал переменного тока, который, будучи усиленным, через трансформатор $T2$ и выпрямитель поступает на вход элемента Т-202.

Начальная фаза импульсов включения, при которой происходит заряд батареи конденсаторов C_n , выбирается из условия, чтобы при понижении напряжения сети на 15% мгновенное напряжение при начальной фазе не было меньше 405 В. Это соответствует фазе 60° эл. Подстройка начальной фазы производится резистором $R5$. Источник $ИЗН$ состоит из двух высокостабилизированных источников постоянного тока на 100 В каждый, собранных по компенсационной схеме с усилителями постоянного тока. Источники соединены последовательно. Напряжение на выходе $ИЗН$ (на резисторе $R4$) регулируется от 75 до 200 В с помощью резистора $R6$, при этом напряжение на резисторе $R4$ плавно меняется в пределах 150—400 В.

4.2. Унифицированные функциональные блоки

Унификация аппаратуры управления, как и всякая унификация, всегда несет в себе избыточность и по комплектующим изделиям, и по геометрическим размерам. Однако, если учесть относительно небольшую серйность и значительную номенклатуру КМ, унификация аппаратуры управления последних оказывается весьма эффективным средством, позволяющим резко сократить сроки проектирования новых КМ, облегчить подготовку производства, упорядочить систему комплектации, упростить наладку и повысить надежность и ремонтпригодность КМ. Созданные

во ВНИИЭСО функциональные блоки на основе элементов «Логика-Т» позволили разработать единую конструкцию станции управления полуавтоматов серии МРК и ПРК для герметизации интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, а также создали предпосылки к переходу на функциональные блоки, выполненные на интегральных схемах. Ряд таких блоков был разработан совместно ВНИИЭСО и заводом «Электрик» им. Н. М. Шверника в последние годы, и эти блоки уже нашли применение в станции управления к высокопроизводительной машине МТК-5002.

Функциональные блоки на основе элементов «Логика-Т» конструктивно выполнены таким образом, что каждый блок имеет свой отдельный вход, колодку питания и выход [10, 4]. Расположение колодок унифицировано, а весь блок, включая навесные элементы, выполнен на отдельной рамке. Всего блоков — пятнадцать.

Блок опорного напряжения предназначен для питания схемы сравнения в зарядном устройстве стабилизированным постоянным напряжением. Блок состоит из двух компенсационных стабилизаторов по 100 В каждый, соединенных последовательно, и обеспечивает стабилизацию выходного напряжения 200 В с точностью не хуже 1%.

Блок управления клапаном имеет две разновидности — с памятью и без нее. В блоке с памятью для реализации запоминания входного сигнала, который может быть импульсным, на входе установлен элемент Т-102 — триггер. Блок предназначен для управления клапанами пневматического устройства КМ, а также для включения мощных реле, электромагнитных муфт и других исполнительных устройств. Максимальная выходная мощность 30 В·А, напряжение 24 В. В блок входят элементы Т-102, Т-404.

Блок задержки также имеет два исполнения, одно из которых, с элементом Т-102, обладает памятью входного сигнала. Блок создает задержку времени для обеспечения заданного технологического процесса сварки. Используя емкостные конденсаторы емкостью 4, 10 и 30 мкФ, можно реализовать задержки от 0,15 до 10 с, что обеспечивает все необходимые режимы. Блок содержит также элемент Т-303, реализующий аналоговую задержку входного сигнала, и элемент Т-401, являющийся усилителем выходного сигнала.

Блок импульсного устройства, содержащий элемент Т-405 — усилитель мощности, предназначен для включения одного или двух тиристорных коммутаторов разрядный ток конденсаторной батареи. Амплитуда выходного импульса на резисторе с сопротивлением 10 Ом не менее 15 В, длительность импульса в средней части не менее 150 мкс.

Блоки питания с выходными напряжениями 6, 12 и 24 В, обеспечивающие соответственно токи 1, 2 и 1 А, предназначены для питания элементов «Логика-Т». Схемы источников питания представляют собой стабилизаторы компенсационного типа с усилителями постоянного тока и обеспечивают стабилизацию выходного напряжения не хуже 0,5% при изменении тока нагрузки и 0,2% — при изменении сетевого напряжения в пределах $-15 \dots +10\%$. Величина пульсаций выходных напряжений составляет не более 0,2%.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИН

5.1. Машины для точечной сварки деталей малых толщин

Возможность получения стабильных импульсов тока длительностью менее 0,01 с обусловила широкое применение КМ для точечной сварки деталей толщиной до 0,3 мм. Этому обстоятельству, собственно, и обязаны КМ своим появлением: впервые КМ была применена именно для сварки деталей малых толщин из нержавеющей стали.

Импульсы тока длительностью менее 0,01 с, подобные импульсам тока КМ, могут быть получены на машинах переменного тока с фазовым регулированием. В этом отношении машины обоих видов имеют примерно одинаковые технологические возможности при сварке деталей толщиной менее 0,3 мм. Однако применение КМ зачастую является предпочтительным благодаря высокой стабильности тока и возможности его плавного регулирования за счет плавного изменения напряжения на конденсаторах.

При длительности импульсов тока более одного полупериода промышленной частоты, т. е. при времени сварки более 0,01 с, подобие формы импульсов исчезает: импульс машин переменного тока имеет прерывистый характер, в то время как форма импульса тока КМ остается плавной. Это различие обуславливает неодинаковые возможности машин при сварке деталей толщиной более 0,3 мм: пульсации тока затрудняют получение высококачественных сварных соединений на машинах переменного тока. При увеличении фазовой отсечки тока, например с целью модуляции тока для предотвращения выплесков, трудности подбора режима сварки на машине переменного тока возрастают. Таким образом, применение КМ в большинстве случаев сварки деталей малых толщин оказывается наиболее целесообразным.

Во ВНИИЭСО разработаны КМ общего назначения типов МТК-1201 и МТК-1601 для точечной сварки деталей из цветных и черных металлов толщиной менее 1,0 мм. Машины близки друг другу по характеристикам и техническим решениям некоторых узлов, но существенно отличаются по конструктивным параметрам и технологическим

Таблица 5.1

Технические данные машин	МТК-1201	МТК-1601	ТКМ-14	ТКМ-15
Номинальный сварочный ток: амплитуда, кА	12	16	—	—
время до амплитуды, с · 10 ⁻³	2	3,6	—	—
Номинальная мощность, потреб- ляемая из сети, кВт · А	1,0	2,0	0,3	0,6
Наибольшая запасаемая энер- гия, Дж	240	400	60	600
Емкость батареи и конденса- торов, мкФ	320—1920	640—3200	50—750	100—1200
Напряжение на батарее кон- денсаторов, В:				
при сварке	100—500	—	200—400	150—1000
при подогреве	—	100—500	200—300	—
Привод сжатия электродов	Пневматический	—	Педаль- ный	Педаль- ный с электро- гидротол- кателем
Усилие сжатия электродов, даН	3—50	9—63	0,05—7	1—50
Вылет электродов, мм	—	—	150	—
Ход верхнего электрода, мм:				
рабочий	5	—	15	20
дополнительный	25	—	—	—
Максимальный темп работы ис- точника питания, циклы в минуту	—	120	—	100
Толщина свариваемых деталей, мм:				
латунь	0,05—0,4	0,05—0,6	—	—
никель	—	—	0,01—0,2	—
нержавеющая сталь	—	—	—	0,05—0,7
низкоуглеродистая сталь	0,05—0,5	0,05—0,8	—	—
Габаритные размеры, мм:				
высота	1350	1365	1000	685
ширина	1000	940	780	800
длина	700	980	1285	—
Масса, кг	270	400	200	—

возможностям. Основные технические данные машин при-
ведены в табл. 5.1.

Корпус машины МТК-1201 имеет форму стола с тум-
бой. На столешнице установлена силовая стойка, на
кронштейне которой закреплен привод сжатия электродов.
Стойка закрыта съемным кожухом, внутри которого раз-
мещено пневматическое устройство. Корпус машины
МТК-1601 (рис. 5.1) имеет форму шкафа с выступающими

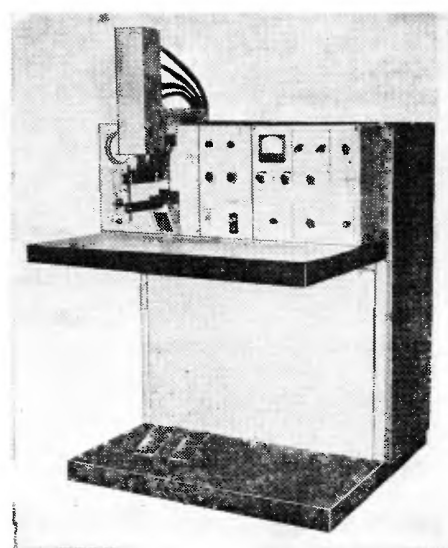


Рис. 5.1. Машина МТК-1601

вперед основанием, столешницей и силовой стойкой. Сто-
лешница может сниматься, что позволяет сваривать на
машине более крупные по размерам изделия, чем на ма-
шине МТК-1201. На верхнем кронштейне силовой стойки
закреплен пневматический привод сжатия электродов с
верхней электродной частью, на нижнем кронштейне —
нижняя электродная часть. Слева от стойки находится
блок пневматического устройства, справа — блок питания
и блок управления. Для осмотра и ремонта блок управле-
ния поворачивается вокруг вертикальной оси и раскрыва-
ется над столешницей таким образом, что обеспечивает
удобный доступ ко всем точкам внутреннего монтажа
блока.

Позади силовой стойки размещен сварочный трансформатор броневое типа, с цилиндрическими обмотками, залитыми эпоксидным компаундом, и с магнитопроводом, набранным из пластин низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм. Магнитопровод имеет воздушный зазор 2 мм.

В нижней части корпуса расположены батарея конденсаторов, блок тиристоров и диодов, зарядный трансформатор и остальные элементы силового электрического устройства и других устройств машины. Для доступа внутрь корпуса имеется двустворчатая дверь с задней стороны машины.

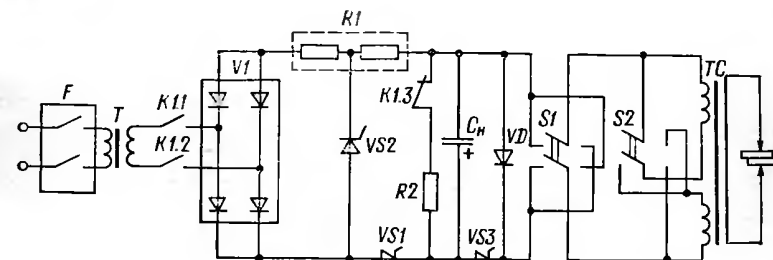


Рис. 5.2. Силловая электрическая схема машины МТК-1601

На рис. 5.2 изображена принципиальная схема силовой электрической части машины МТК-1601. Батарея конденсаторов C_n состоит из 20 металлобумажных конденсаторов МБГВ (160 мкФ, 500 В) и разделена на три секции: 4+8+8 конденсаторов. Специальный переключатель обеспечивает регулирование емкости батареи четырьмя ступенями. Заряд батареи производится от неуправляемого мостового выпрямителя $V1$ через тиристор $VS1$ и токоограничительный резистор $R1$. Выпрямитель $V1$ подключается к повышающему зарядному трансформатору T через контакты пускателя $K1$, один из контактов которого включен также в цепь резистора $R2$, предназначенного для шунтирования батареи C_n при отключениях выпрямителя $V1$ от трансформатора T . Первичная обмотка T присоединяется к электросети через автоматический выключатель F .

Тиристор $VS2$ служит для шунтирования зарядного выпрямителя $V1$ в момент достижения напряжением на конденсаторах батареи C_n заданного уровня. Применение шунтирующего тиристора $VS2$ обеспечивает высокую стабильность рабочего напряжения на конденсаторах машины МТК-1601, работающей в режиме релаксационного сброса напряжения при разряде (см. § 1.3). Для ограничения

шунтирующего тока последовательно с $VS2$ включена одна секция резистора $R1$.

Разряд батареи на первичную обмотку сварочного трансформатора TC осуществляется через тиристор $VS3$. Импульсы разрядного тока батареи следуют через обмотку TC в одном направлении. В случае необходимости направление импульсов тока может быть изменено на противоположное с помощью пакетного переключателя $S1$. Переключение двух ступеней первичной обмотки TC , состоящей из двух секций, осуществляется пакетным переключателем $S2$.

Силовая электрическая часть машины МТК-1201 выполнена в основном по рассмотренной схеме и имеет следующие отличия: отсутствуют шунтирующий вентиль $VS2$ и переключатель полярности тока $S1$; ограничивающее сопротивление регулируется с помощью переключателя одновременно с изменением емкости батареи (сопротивление увеличивается при уменьшении емкости и наоборот). Последнее способствует стабилизации заданного напряжения на конденсаторах машины МТК-1201, работающей в режиме автоматического поддержания напряжения (см. § 1.3). Батарея конденсаторов состоит из двенадцати конденсаторов типа МБГВ, разделенных на три секции: 2+2+8 конденсаторов. Первичная обмотка сварочного трансформатора имеет четыре секции и четыре ступени включения.

Цепи управления машин полностью отличаются друг от друга как по схеме, так и по элементной базе. В машине МТК-1201 используются полупроводниковые приборы и электромагнитные реле, причем последние работают в каждом цикле. Цикл работы машины МТК-1201 состоит из трех операций: «сжатие», «сварка» и «пауза», очередность и длительность которых определяются регулятором цикла, состоящим из однотипных транзисторно-релейных ячеек с RC -цепочками задержки времени.

Аппаратура управления машины МТК-1601 собрана на стандартных логических элементах серии «Логика-Т» и не содержит электромагнитных реле. Регулируемые элементы и переключатели, рукоятки которых выведены на панель управления, позволяют установить требуемый режим работы машины. Сварка деталей на машине МТК-1601 может осуществляться как одним, так и двумя импульсами. В двухимпульсном цикле сварки заряд батареи осуществляется дважды и до разных уровней напряжения, причем при первом заряде напряжение на конденсаторах может быть выше или ниже, чем при втором. Это возможно бла-

годаря применению двух работающих по очереди каналов управления, на входные элементы которых подаются сигналы обратной связи по напряжению на конденсаторах. Последние регулируются независимо друг от друга.

Основным отличием одноимпульсного режима, кроме одного импульса тока, является двухступенчатый заряд батареи конденсаторов, осуществляемый за счет использования обоих каналов управления зарядом при одном заданном уровне напряжения на конденсаторах [2]. При настройке на цикл одноимпульсной сварки входы обоих каналов управления подключаются к одному задатчику уровня напряжения, при этом уровень срабатывания порогового элемента в первом канале управления искусственно занижается (примерно на 20%) относительно уровня срабатывания порогового элемента второго канала управления. В результате заряд конденсаторов начинается сразу после окончания операции «сварка» и прекращается при напряжении ниже заданного примерно на 20%. По окончании операции «сжатие» происходит дозаряд конденсаторов до заданного уровня и разряд последних на сварочный трансформатор. Двухступенчатый заряд конденсаторов в цикле одноимпульсной сварки позволяет значительно снизить потребляемую мощность, размеры и стоимость зарядного устройства по сравнению с одноступенчатым зарядом, осуществляемым после зажатия деталей между электродами машины (при условии, что темп работы и длительность паузы одинаковы в обоих случаях).

Для облегчения поиска возможных неисправностей в цепях управления машины МТК-1601 предусмотрен блок контроля: выведенные на панель управления переключатель и сигнальная лампа блока позволяют по очереди проверить сигналы в девяти точках схемы управления.

В машине МТК-1201 применены два пневматических привода: диафрагменный привод, обеспечивающий рабочий ход верхнего электрода и сварочное усилие сжатия электродов, и поршневой привод дополнительного хода верхнего электрода. Пневматический привод машины МТК-1201 обеспечивает широкий (1:20) диапазон регулирования усилия сжатия электродов и высокую подвижность верхнего электрода в процессе сварки. Последнее обусловлено применением резиновых диафрагм и направляющих качения, а также отсутствием уплотнений по штоку и малой массой движущихся частей.

В машине МТК-1601 применен пневматический привод с двумя поршнями — рабочим и вспомогательным. Первый (нижний) поршень связан с ползуном, перемещающимся

в направляющих качения, и служит для создания усилия сжатия электродов. Второй (верхний) поршень используется для регулирования рабочего хода электрода и для обеспечения дополнительного хода электрода. Приводы такого типа широко используются в машинах контактной сварки. В приводе применены воротниковые манжеты, рассчитанные на относительно низкие давления сжатого воздуха, т. е. манжеты с небольшими по высоте и эластичными краями. Это позволило заметно снизить трение скольжения и, следовательно, повысить стабильность малых (несколько деканьютонов) усилий сжатия электродов. Повышенные динамические качества поршневого привода с новыми манжетами позволили применить его к мало мощной машине взамен диафрагменного привода, так как по сравнению с последним он обладает рядом преимуществ. К ним, в частности, относятся большой ход электрода, независимость развиваемого усилия от хода электрода.

Машина МТК-1201 была разработана взамен машины МТК-2 и серийно выпускалась до 1975 г. Машина МТК-1601, серийное изготовление которой началось с 1976 г., заменяет машину МТК-1201. Наряду с этими машинами в стране серийно производятся КМ малой мощности серии ТКМ, среди которых наиболее распространеной является машина ТКМ-7. Машины этой серии были первыми отечественными КМ промышленного применения, широко известны и поэтому здесь не рассматриваются. В последние годы в ИЭС имени Е. О. Патона были разработаны новые КМ малой мощности, среди которых отметим серийные машины ТКМ-15 и ТКМ-14.

Машина ТКМ-15 заменяет ТКМ-7 и предназначена для точечной сварки деталей из цветных и черных металлов и сплавов толщиной до 0,7 мм и диаметром до 1,5 мм. В машине применены pedalный механизм сжатия электродов с высокими динамическими свойствами и источник питания, обеспечивающий комбинированный цикл подогрев — сварка. Бесконтактная схема управления и тиристоры в силовых цепях обеспечивают надежность машины.

Машина ТКМ-14 предназначена для точечной сварки микродеталей при производстве изделий электроники, радиоэлектроники и точного приборостроения. Сварочная головка машины размещена под колпаком, и сварка деталей производится в очищенной от пыли воздушной среде. Источник питания с бесконтактной схемой управления обеспечивает двухимпульсный цикл сварки подогрев — сварка. Pedальный механизм сжатия электродов обеспе-

чивает соосность электродов и параллельность их рабочих плоскостей. Основные технические данные машин ТКМ-14 и ТКМ-15 приведены в табл. 5.1.

5.2. Машины для точечной сварки деталей больших толщин

Мощные КМ были разработаны для сварки изделий ответственного назначения из легких сплавов толщиной до 2,5 мм. Применяемые для этих же целей низкочастотные машины имели потребляемую из трехфазной сети мощность до 400 кВ·А, были недостаточно надежны из-за игнитронных прерывателей в первичной цепи. Машины МТК-15, МТК-63 и МТК-75, выпускаемые в 60-х и начале 70-х годов серийно, решили задачи сварки изделий из легких сплавов, сплавов титана и нержавеющей сталей, имея при этом максимальную потребляемую из сети мощность 75 кВ·А (МТК-75), высокие показатели по стабильности сварки и надежности работы.

В 70-х годах завод «Электрик» им. Н. М. Шверника разработал новые, более совершенные машины МТК-5001 и МТК-8004 взамен МТК-63 и МТК-75 и приступил к их серийному выпуску. Изменения в первую очередь коснулись аппаратуры управления и силового электрооборудования. Аппаратура управления обеих машин построена по единой принципиальной электрической схеме, в основном на элементах «Логика-Т», и размещена в отдельной станции управления. Силовое электрооборудование функционально также одинаково; здесь в зарядной и разрядной цепях применены тиристоры, а изменение полярности разрядного тока на сварочном трансформаторе достигается переключением электромеханических контакторов. Батарея конденсаторов обеих машин состоит из электрических конденсаторов К50И-1, размещенных в специальных конденсаторных шкафах. Конденсаторные шкафы у машин МТК-5001 и МТК-8004 — одинаковые, однако первая машина комплектуется одним шкафом с размещенными в нем конденсаторами в количестве 300 шт., вторая — двумя шкафами, в которых размещены 860 конденсаторов.

Приводы сжатия у машин МТК-5001 и МТК-8001 различны. В машине МТК-5001 применен поршневой привод из легких сплавов, давление от поршня передается на подней — рабочей и нижней. Для создания хороших динамических свойств, особенно необходимых при сварке изделий из легких сплавов, давление от поршня передается на подвижный верхний электрод машины через тарельчатую пружину.

Привод сжатия машины МТК-8004 представляет собой привод диафрагменного типа. Применение этого привода позволяет избежать заклиниваний и залипаний и стабилизировать усилие сжатия с высокой точностью (до $\pm 5\%$). Привод состоит из двух камер, одна из которых предназначена для создания сварочного усилия, другая — для создания ковочного усилия. Первая камера в области малых усилий сжатия работает в режиме с подпором, в области больших усилий — без подпора, однако воздух выбрасывается из нижней половины камеры лишь после замыкания электродов машины, что позволяет избежать сильных ударов.

Машины МТК-5001 и МТК-8004 имеют пять режимов сжатия: режим постоянного сварочного усилия, режим сварочного усилия с предварительным обжатием, режим сварочного усилия с предварительным обжатием и ковкой, режим сварочного усилия с ковкой и режим постоянного повышенного усилия. Точность и стабильность приложения ковочного усилия достигаются благодаря тому, что выдержка времени на включение ковочного клапана начинает отсчитываться с момента подачи команды на включение разрядного тиристора (т. е. на разряд), который является практически безынерционным прибором, а также благодаря применению форсировки при включении клапана. Форсировка достигается путем разряда конденсатора с начальным напряжением 160 В на клапан, катушка которого рассчитана на 24 В.

Технические характеристики машин МТК-5001 и МТК-8004 приведены в табл. 5.2. Следует отметить, что первые образцы машин МТК-5001 выпускались со сварочным трансформатором, имеющим коэффициент трансформации 37 (при параллельном включении обмоток) и 74 (при последовательном включении обмоток). Стремление улучшить качество сварки и увеличить диаметр литого ядра за счет увеличения длительности нарастания сварочного тока и импульса тока в целом было причиной перехода на коэффициенты трансформации 74 (при параллельном включении обмоток) и 148 (при последовательном включении обмоток). Цель — увеличение длительности тока — была достигнута, однако этому сопутствовали и некоторые негативные процессы, а именно резкое увеличение тока намагничивания, значительное увеличение обратного напряжения на батарее конденсаторов, дополнительная нагрузка на электромеханические контакторы, разрывающие значительный первичный ток. Исходя из этого, а также учитывая, что более «мягкие» импульсы безусловно

способствуют получению лучшего качества сварки, можно лишь рекомендовать применять в эксплуатации коэффициент трансформации 148 при неполной емкости батареи конденсаторов и неполном напряжении на батарее.

Таблица 5.2

Технические данные машин	МТК-5001	МТК-8004	МТК-5002
Номинальный сварочный ток:			
амплитуда, кА	50	80	50
время до амплитуды, с	0,025	0,04	0,025
Номинальная мощность, потребляемая из сети, кВт·А	20	60	32
Наибольшая запасаемая энергия, кДж	8,5	24	8,9
Номинальная емкость батареи конденсаторов, мкФ	105 000	300 000	19 600
Номинальное напряжение на батарее конденсаторов, В	380		950
Усилие сжатия, даН:			
максимальное сварочное	630	2500	—
минимальное сварочное	200	180	100
максимальное ковочное	1600	5000	1600
Вылет электродов, мм	600	1500	600
Раствор консолей, мм:			
минимальный	150	—	170
максимальный	300	500	300
Номинальная производительность, св/мин	30		60
Диапазон свариваемых толщин, мм:			
легкие сплавы	0,3—1,5	0,5—2,5	0,3—1,5
титановые сплавы	0,3—1,5	0,5—2,5	0,3—1,5
нержавеющая сталь	0,3—1,2	0,3—2,0	0,3—1,2
Габаритные размеры машины, мм:			
высота	2460	2850	2250
ширина	1000	1220	780
длина	2400	3400	2600
Масса машины, кг	2800	6000	2700

В табл. 5.2 приведены технические данные машины МТК-5002, первый образец которой был разработан и изготовлен заводом «Электрик» им. Н. М. Шверника в 1982 г. С созданием этой машины решена основная задача по совершенствованию КМ большой мощности — задача повышения производительности. Производительность машин МТК-5001 и МТК-8004 была ограничена допустимым темпом циклирования в режиме заряд—разряд электролитических конденсаторов К50И-1 и равнялась 30 сваркам в

минуту. Производительность машины МТК-5002 увеличена ровно вдвое по сравнению с МТК-5001 и равняется 60 сваркам в минуту за счет применения металлобумажных конденсаторов типа МБГВ на напряжении до 1000 В и емкостью 200 мкФ каждый. При этом стоит отметить, что масса и габариты машины в целом не только не увеличились, но даже несколько уменьшились, а эти же параметры для конденсаторного шкафа остались на прежнем уровне. Это объясняется более удачной компоновкой самой машины, сварочный трансформатор в которой расположен в центре, а также конденсаторного шкафа, в котором кон-

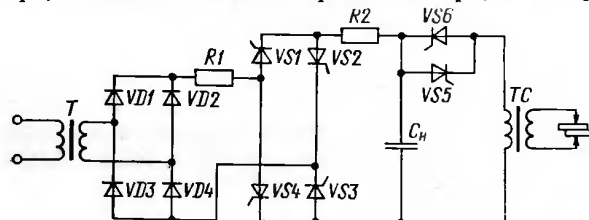


Рис. 5.3. Силовая электрическая схема машины МТК-5002

денсаторы, имеющие прямоугольный корпус, расположены лежа, выводами на обе стороны к открывающимся дверям шкафа. Такое размещение исключает ящики и дополнительные свободные пространства между ними, как при электролитических конденсаторах, делает более удобной эксплуатацию. Следует отметить также значительное повышение такого важного фактора, как надежность, которая у металлобумажных конденсаторов выше, чем у электролитических.

На рис. 5.3 приведена принципиальная схема силовой части машины МТК-5002. Задача реверсирования тока в сварочном трансформаторе TC решается здесь за счет изменения полярности напряжения на батарее конденсаторов C_н в каждом цикле, что достигается поочередной работой тиристоров VS1, VS3 — зарядных и VS5 — разрядного и тиристоров VS2, VS4 — зарядных и VS6 — разрядного. При работе тиристоров VS1, VS3 батарея C_н заряжается напряжением положительной полярности на верхней обкладке. При включении тиристоров VS5 батарея C_н разряжается на сварочный трансформатор TC и, так как разряд носит колебательный характер, перезаряжается до некоторого уровня (100—300 В) напряжением положительной полярности на нижней обкладке. Это способствует более эффективному использованию энергии (в машинах

МТК-5001 и МТК-8004 остаток энергии для избежания перезаряда электролитических конденсаторов бесполезно расходуется на шунтирующем сопротивлении) и снижает пиковую и среднюю мощности, потребляемые машиной из сети. В следующем цикле для заряда включаются тиристоры VS2, VS4, для разряда — тиристор VS6. Ток заряда в машине ограничивается двумя резисторами R1, R2 суммарной мощностью около 10 кВт. Зарядный трансформатор T повышает напряжение сети 380 В до 850 В на вторичной обмотке. При этом напряжении реализуется оптимальное отношение 0,8 номинального напряжения на C_н, равного 950 В, к амплитудному значению напряжения источника питания. При этом отношении имеют место минимальные типовая мощность зарядного трансформатора и мощность балластных резисторов. Аппаратура управления машиной размещена в отдельной станции и выполнена в основном на интегральных микросхемах серии К511, конструктивно размещенных в унифицированных функциональных блоках.

5.3. Машины и полуавтоматы для герметизации корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

При производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем одной из важнейших заключительных операций является герметизация их корпусов, так как герметичность корпусов, защищающих приборы от механических повреждений и вредных влияний окружающей среды, в конечном счете определяет надежность приборов.

Герметизация наиболее массовых металлокерамических корпусов осуществляется преимущественно на машинах для контактной сварки, среди которых большую часть составляют КМ. Это обусловлено тем, что КМ обеспечивают высокое и стабильное качество сварных соединений. Кроме того, благодаря кратковременности процесса сварки нагрев корпуса вне зоны сварки является незначительным. В результате предотвращаются перегрев полупроводниковой структуры, разрушение стеклянных изоляторов и газовыделение внутри корпуса (следствием последнего могло бы быть недопустимое осаждение паров металлов на структуре и изоляторах). Обе детали корпуса — баллон (крышка) и основание (ножка), предназначенные для контактной сварки, должны иметь отбортовки в местах их соединения. Форма деталей может быть круглой или прямоугольной.

Первыми отечественными машинами для герметизации были МТК-5-3, МТК-8003, МТК-16001. Эти машины представляют собой однопозиционные установки, загрузка свариваемых изделий в электродные устройства которых и выгрузка из них производятся одним оператором вручную. Машины оснащены специальными скафандрами для создания на рабочей позиции контролируемой среды — осушенного воздуха, азота, гелия. Энергия для сварки запасается в батарее электролитических конденсаторов К50И-1, допускающих использование при частоте следования разрядных импульсов не менее 30 в минуту. Количество запасаемой энергии регулируется в широких пределах изменения емкости конденсаторов и напряжения на них. Сварка производится при разряде батареи конденсаторов на сварочный трансформатор, при этом включение разряда и изменение полярности сварочного тока обеспечиваются двумя электромеханическими контакторами, работающими поочередно. На машинах МТК-5-3, МТК-8002, МТК-16001 реализуется одноимпульсный режим сварки. Технические данные этих машин приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Технические данные машин	МТК-5-3	МТК-8002	МТК-16001	МРК-3201
Номинальный сварочный ток, кА	32	80	160	32
Мощность, потребляемая из сети, кВт/А:				
длительная	5	20	40	5
максимальная	8	32	65	8
Запасаемая энергия, кДж	2,74	14,8	44	2,5
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	34 300	184 800	550 000	31 500
Напряжение на конденсаторах, В	150—400	200—400		150—400
Усилие сжатия электродов, даН	40—400	150—1250	300—3000	100—400
Периметр свариваемых деталей, мм	35	80	160	35
Максимальный темп работы, св/ч	1200	900	720	1200
Габаритные размеры машины, мм:				
высота	1760	1860	2320	1600
ширина	1260	1250		1160
длина	1030	1320	2800	1080
Масса, кг	750	1750	5400	750

В последние годы взамен морально устаревшей машины МТК-5-3 была разработана машина МРК-3201, которая отличается от своей предшественницы электрооборудованием. Вместо тириатронов и контакторов в зарядной и разрядной цепи машины МРК-3201 применены тиристоры. В схеме управления вместо электронных ламп и электромеханических реле применены элементы «Логика-Т». Изменения в электрооборудовании не коснулись лишь батареи конденсаторов и сварочного трансформатора.

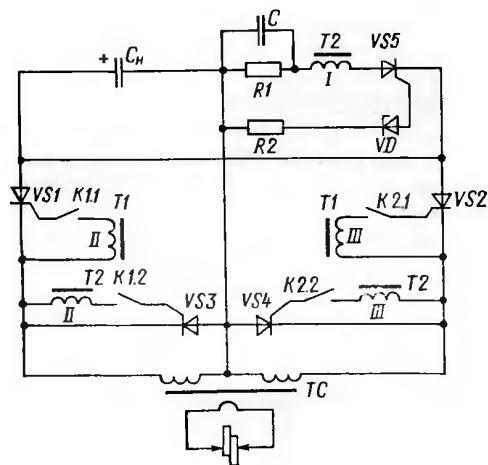


Рис. 5.4. Схема разрядной части машины МРК-3201

Принципиальная электрическая схема силовой разрядной части машины МРК-3201 приведена на рис. 5.4. Разряд батареи конденсаторов C_n на сварочный трансформатор TC , так же как и перемагничивание последнего, производится при поочередном включении тиристоров $VS1$ и $VS2$. Для предотвращения перезаряда C_n применяются два шунтирующих тиристора $VS3$ и $VS4$. Предположим, что контактами реле $K1$ подготовлены к включению тиристоры $VS1$ и $VS3$. Тиристор $VS1$ включается через импульсный трансформатор $T1$. При колебательном процессе разряда, когда напряжение на батарее C_n меняет знак на противоположный и достигает напряжения пробоя стабилитрона VD , равного 24 В, последний пробивается и включается тиристор $VS5$. В цепи тиристора $VS5$ проходит обусловленный емкостью C импульс тока, который трансформиру-

ет $VS3$. Перезаряд батареи C_n прекращается, тиристор $VS1$ выключается, ток, обусловленный энергией, запасенной в индуктивности сварочного контура, шунтируется через тиристор $VS3$. Аналогичным образом в следующем цикле, но уже с изменением направления сварочного тока, работают тиристоры $VS2$, $VS4$, причем цепи управления последних подготавливаются реле $K2$.

При массовом выпуске интегральных схем и полупроводниковых приборов производительность однопозиционных машин является недостаточно высокой. Полуавтоматы, предназначенные для промышленной эксплуатации, в том числе в составе поточных линий, имеют более высокую производительность благодаря оснащению их многопозиционными поворотными столами.

Серия высокопроизводительных машин для герметизации приборов состоит из пяти типоразмеров: МРК-2001, МРК-4001, МРК-10001, МРК-16001 и МРК-16003. Первая из машин предназначена для герметизации наиболее массовых транзисторов, последняя — для герметизации мощных тиристоров и диодов на токи в несколько сотен ампер. Остальные машины применяются для герметизации преимущественно интегральных схем. Основные технические данные машин серии МРК приведены в табл. 5.4.

Детали свариваемых корпусов полупроводниковых приборов и интегральных схем — баллоны и основания — изготавливаются из кобальта, никеля и стали Ст.10 толщиной 0,2—0,4 мм. Детали из стали имеют никелевое покрытие 6—20 мкм. Мощные диоды и тиристоры имеют массивные основания из меди, и приварка к ним баллонов осуществляется через промежуточные стальные кольца, припаянные к основаниям. На кольцах выполнены рельефы. Загрузка свариваемых деталей в электродные головки производится вручную, выгрузка — автоматически. Конструкция машин позволяет работать на них одновременно двум операторам, что бывает необходимо при работе с максимальной производительностью. Особенности рельефной сварки корпусов мощных полупроводниковых вентилялей на машине МРК-16003 приведены в приложении.

В состав каждой машины входят сварочная установка и станция управления. Кроме того, в состав мощных машин входит также один (МРК-10001) или два конденсаторных шкафа (МРК-16001, МРК-16003). В менее мощных машинах (МРК-2001, МРК-4001) батареи рабочих конденсаторов размещены в станциях управления.

Таблица 5.4

Технические данные полуавтоматов	МРК-2001	МРК-4001	МРК-10001	МРК-16001	МРК-16003	ПРК-4001	ПРК-12001
Номинальный сварочный ток, кА	20	40	100		160	40	120
Мощность, потребляемая из сети, кВт·А:							
длительная . .	4	9	28		41	10	40
максимальная	9	15	44		63	17	60
Запасаемая энергия, кДж	1,2	3,5	16		32	4,4	32
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	11 200	44 100	201 200		404 000	56 000	404 000
Усилие сжатия электродов, даН:							
минимальное	40	100	200	400	700	100	400
максимальное	300	500	1200	2000	4000	500	2000
Толщина свариваемых деталей из ковара, никеля, стали, мм		0,2—0,4			0,2—0,5	0,2—0,4	0,2—0,5
Периметр свариваемых деталей, мм:							
минимальный	9	22	55	100		20	30
максимальный	27	55	100	150		55	100
Максимальный темп работы, св/ч	1800	1200			900	1800	1000
Габаритные размеры, мм:							
высота	1690	1905	2060	2310	2405	—	—
ширина	1670	1170		1150	1240	—	—
длина	2070	1650	2030	2280	2355	—	—
Масса, кг	—		3000	5200	5500	—	—

Примечание. Напряжение питающей сети 380 В; напряжение заряда конденсаторов 150—200 В.

Машины серии МРК имеют много принципиально подобных и одинаковых узлов и систем. Сварочная установка каждой машины состоит из сварочного устройства и блока герметизации, состыкованных друг с другом и установленных на общем основании. Блоки герметизации, в состав которых входят поворотные столы, механизмы вращения и скафандры, в значительной мере отличаются друг от друга. Сварочные устройства машин, предназначенные для создания сварочного давления на электродах головок поворотных столов и для подвода к ним сварочного тока, являются однотипными. Во время работы машины по циклу между токоподводами — верхним и нижним зажимаются электрододержатели одной из сварочных головок, равномерно закрепленных по периметру поворотного стола. Последний установлен на валу механизма поворота, привод которого осуществляется от электродвигателя. Поворотный стол накрыт сверху скафандром.

Пневматические приводы всех машин — диафрагменные, с двумя рабочими камерами и двумя разными по размерам резиновыми диафрагмами (за исключением машин МРК-16003, где применены две одинаковые диафрагмы, помещенные в изолированные друг от друга камеры). Направление хода ползуна создается четырьмя парами шарикоподшипников.

Поворотные столы машин МРК, отличаясь друг от друга конструктивно, работают по одному принципу, для пояснения которого на рис. 5.5 приведена кинематическая схема поворотного стола машины МРК-10001. Поворотный стол, а также механизм разгрузки приводятся в движение от асинхронного двигателя 1. Через червячный редуктор 3 движение передается кулачку-улитке 4 с пазом специального профиля. В зацеплении с улиткой постоянно находится один из двенадцати роликов 5, расположенных по окружности диска, жестко связанного с валом карусели 6. Через диск и вал движение передается поворотному столу 10. Улита вращается непрерывно, движение поворотного стола имеет шаговый характер. С помощью регулятора скорости 2 устанавливается темп работы 6—20 шагов в минуту. Поворотный стол, вращаясь против часовой стрелки, останавливается после каждого поворота на угол 30°, в результате чего за один оборот стола сварочные головки последовательно занимают двенадцать позиций. На позициях загрузки и выгрузки верхние электрододержатели контактных головок 12 подняты и электроды разомкнуты. Электрододержатели опускаются перед сваркой и поднимаются после нее механизмами 11 и 8 в виде путевых кулач-

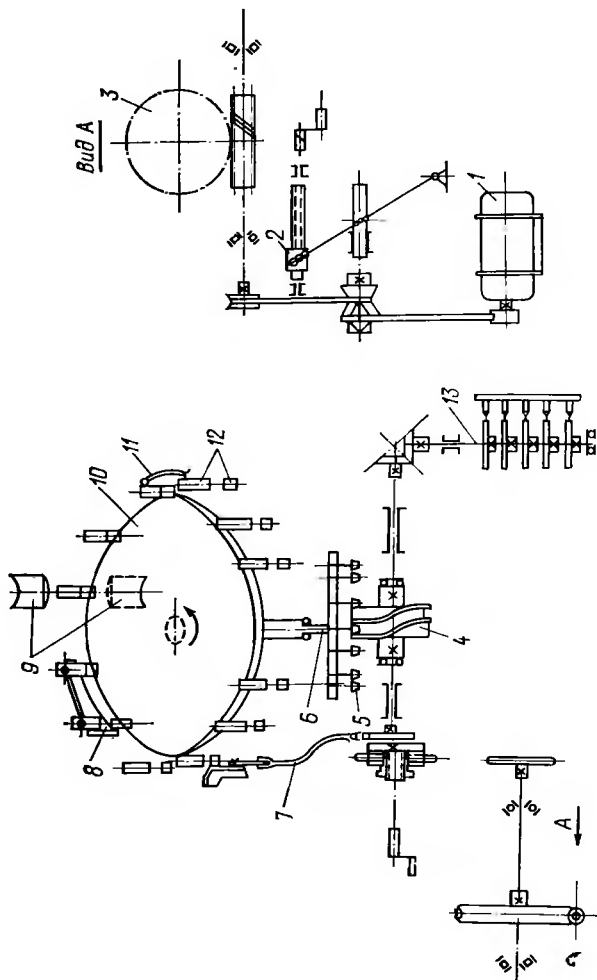


Рис. 5.5. Кинематическая схема поворотного стола

жов, расположенных соответственно на подходах к позициям сварки (токоподводам сварочного устройства 9) и разгрузки. Механизм разгрузки 7 представляет собой выталкиватель, движение которому передается с помощью шарикового привода от кулачка, установленного на валу улиты. Команды, необходимые для согласования работы карусели с пневмоприводом машины и ее электрическим устройством, поступают от микровыключателей, установленных рядом с распределительным валом 13. Каждый из кулачков распределительного вала имеет профиль, соответствующий назначению кулачка.

Необходимо отметить, что в машине МРК-16003 реализуется двухимпульсный режим сварки, для чего батарея конденсаторов разделена на две секции, которые могут быть заряжены до одинакового напряжения. Схема силовой электрической части машины МРК-16003 аналогична схеме, представленной на рис. 1.8.

Машины типа МРК были выпущены от 1 до 10 единиц каждая. Эксплуатация этих машин дала положительные результаты, и на их базе в конце 70-х годов были разработаны два полуавтомата ПРК-4001 и ПРК-12001, серийный выпуск которых освоил ПЗТЭСО. Станции управления для них изготавливает завод «Электрик» им. Н. М. Шверника. По назначению, принципу действия, конструкции эти полуавтоматы аналогичны машинам МРК. Основными отличиями, позволяющими получить более высокую стабильность качества сварки, являются двухимпульсный режим и приложение в процессе сварки повышенного усилия — проковка. Технические данные полуавтоматов ПРК-4001 и ПРК-12001 приведены в табл. 5.4.

5.4. Машины для шовной сварки

КМ для шовной сварки не нашли такого широкого применения в промышленности, как КМ для точечной и рельефной сварки. Для мощных машин это объясняется в первую очередь тем, что в режиме шовной сварки при частоте сварочных импульсов до 10—25 Гц шовные КМ теряют одно из основных преимуществ конденсаторных машин — значительно меньшее потребление мощности из электросети. Технологических же преимуществ в этой области КМ также не имеют. Маломощные шовные КМ имеют технологические преимущества перед другими машинами лишь при сварке изделий в области толщин 0,05—0,2 мм, где дискретность полупериода сетевого напряжения длительностью 10 мс является лимитирующим факто-

ром для получения стабильного и качественного сварного соединения.

В конце 60-х годов во ВНИИЭСО была разработана и изготовлена шовная КМ типа МШК-1601 для сварки плоских листовых изделий из латуни, нержавеющей стали, никеля и других металлов толщиной от $(0,05+0,05)$ до $(0,3+0,3)$ мм прочноплотным швом. Изделия могут быть сварены как прямолинейным швом длиной до 350 мм, так и кольцевым по радиусу 50—170 мм. Впервые в отечественной шовной КМ было применено шаговое вращение роликов, что должно было расширить технологические возможности машины, особенно при сварке тонколистового никеля. Отметим сразу, что существенных преимуществ впоследствии выявить не удалось, и поэтому в последующих шовных КМ шаговый электропривод уже не применялся.

Основу принципиальной электрической силовой схемы машины МШК-1601 составляет схема, изображенная на рис. 1.5, а. Предусмотрена возможность широкого регулирования импульсов сварочного тока посредством изменения коммутирующей емкости C_k от 70 до 2000 мкФ, напряжения на накопительной батарее конденсаторов от 200 до 400 В, коэффициента сварочного трансформатора от 50 до 100. Машина МШК-1601 состоит из собственно машины и станции питания и управления. Сварка кольцевых швов осуществляется при повороте горизонтального диска из хромистой бронзы диаметром 400 мм. Последний укреплен на токоведущем валу, проводимом во вращение через червячную и цилиндрическую передачи от шагового электропривода. Сварка прямолинейных швов осуществляется при поступательном движении рожка, входящего в узел каретки, связанной с ходовым винтом. Для обеспечения глубокого регулирования усилий на сварочных роликах в пределах 6—130 даН в машине предусмотрены две сменные электродные головки с приводом давления. При малых усилиях (6—30 даН) применяется электродная головка с пневмопружинным приводом давления, при усилиях 30—150 даН—головка с пневматическим приводом давления.

В последние годы совместно ВНИИЭСО, ИЭС им. Е. О. Патона и заводом «Электрик» им. Н. М. Шверника созданы шовные КМ типа МШК-1602 и МШК-1603, первая из которых выпускается серийно. Машина МШК-1603 (рис. 5.6) предназначена в основном для сварки тонколистового никеля толщиной от 0,1 до 0,3 мм; она заменяет машину МШК-1601 и в то же время существенно

от нее отличается. На машине МШК-1603 возможна сварка только прямолинейных швов. Перемещение создается за счет плавного поперечного хода стола, протяженность которого в обе стороны от среднего положения составляет 200 мм. На машине может быть осуществлена сварка между двумя роликами, при этом второй ролик устанавливается вместо стола. Электроприводом является серийно выпускаемый электропривод типа ЭТО-1, позволяющий

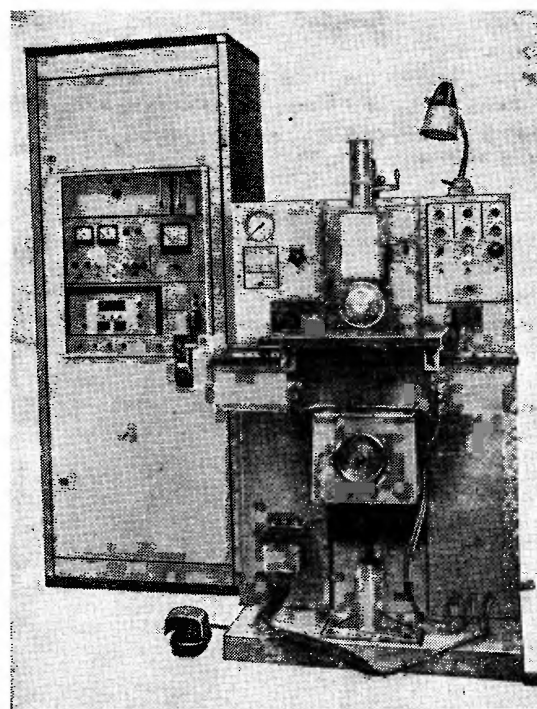


Рис. 5.6. Машина МШК-1603

регулировать скорость в диапазоне 1:20. Существенным отличием от машины МШК-1601 является наличие двухимпульсного режима сварки, позволяющего за счет введения подогретого импульса улучшить качество сварки. С этой целью батарея конденсаторов (применены конденсаторы К75-17 емкостью 50 мкФ каждый, напряжением

1000 В) разделена на две части, каждая из которых имеет самостоятельные зарядные и разрядные цепи. За счет специального устройства, регулирующего время задержки между подогривным и сварочным импульсом от 0,5 до 8,0 мс, имеется возможность получать режимы сварочного тока с наложением импульсов и с паузой между ними. Аппаратура управления размещена в отдельном шкафу, состоит из функциональных блоков, элементной базой которых являются интегральные микросхемы серии К511. В состав аппаратуры управления входит измеритель амплитудного значения импульсов сварочного тока, которое в цифровом виде показывается на специальном табло. Пневматический пружинно-поршневой привод обладает хорошими динамическими характеристиками и обеспечивает регулирование усилия сжатия от 10 до 120 даН.

Шовная КМ типа МШК-1602 (завод «Электрик» им. Н. М. Шверника) по технологическим возможностям и аппаратурной части является подобием машины МШК-1603. Основное ее назначение — сварка поперечным швом деталей из нержавеющей стали, цветных металлов и сплавов толщиной от 0,05 до 0,4 мм, в том числе сварка сильфонных и мембранных компенсаторов, узлов коммутационной аппаратуры, герметизация электровакуумных приборов и изделий неравной толщины. Силовая электрическая схема машины МШК-1603 аналогична схеме, изображенной на рис. 2.8, б, за тем лишь исключением, что контур для гашения зарядного тиристора $VS1$ применен здесь и для гашения разрядного тиристора $VS3$. Принудительное гашение тиристора $VS3$ оказывается полезным при сварке относительно высокоомных сплавов, например сталей, когда разряд батареи конденсаторов на сварочный трансформатор носит аperiodический характер, т. е. затягивается, что приводит к снижению скорости сварки. Привод сильфонного типа позволяет регулировать усилие сжатия в пределах 17—174 даН. Наименьшая окружная скорость сварки составляет 0,1 м/мин, а наибольшая — 1,5 м/мин. Частота сварочных импульсов 2—25 Гц; при сварке деталей толщиной 0,4 мм частота равна 10 Гц. Емкость батареи, составленной из конденсаторов типа К75-17, регулируется от 200 до 1800 мкФ, напряжение на батарее — от 150 до 650 В.

Завод «Электрик» постоянно работает над повышением технического уровня и надежности выпускаемых машин, уделяя при этом большое внимание вопросам унификации. Так, в настоящее время проводится работа по унификации схем силовых и управления КМ. За основу силовой схемы

взята схема машины МТК-5002 (см. рис. 5.3), обладающая наилучшими энергетическими показателями и более высокой надежностью. Поэтому с 1983 г. машины МШК-1602 выпускаются заводом с измененной силовой электрической частью.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ КОРПУСОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ НА КОНДЕНСАТОРНЫХ МАШИНАХ

Во ВНИИЭСО отработана технология герметизации рельефной сваркой корпусов мощных полупроводниковых диодов и тиристоров. Корпус состоит из массивного медного основания круглого сечения, по внешнему контуру которого припаяно кольцо прямоугольного сечения с выполненным на нем рельефом треугольной формы, имеющее диаметр 36 мм, высоту 0,5 мм и ширину 0,6 мм у основания. При герметизации корпуса к кольцу приваривается манжета, припаянная к керамическому изолятору крышки корпуса. Типичными представителями свариваемой конструкции являются тиристоры ТЛ-160, ТЛ-200 диоды ВЛ-200.

Особенности свариваемого изделия: большое соотношение толщин, разнородность материалов соединяемых деталей (манжета — из кобальта 29НК толщиной 0,5 мм, кольцо — из стали Ст. 10 толщиной 3,5 мм), изменение высоты рельефа по периметру кольца, наличие никелевого покрытия на кольцах и изменение его толщины от детали к детали, неровная поверхность манжет в месте сварки, наличие паяных контактов.

Отработку технологии производили на макете конденсаторной машины и затем на конденсаторной машине МРК-16003, (см. § 5.3), спроектированной с учетом технологических требований, выявленных в результате сварки на макете.

При сварке проводили осциллографирование сварочного тока (с выхода прибора АСУ-1М), напряжения между электродами, усилия сжатия электродов (с выхода тензостанции 4-АН4-3, датчики которой фиксировали степень сжатия пружины привода давления), перемещения верхнего электрода относительно нижнего (с помощью потенциометрического датчика) и первичного тока (с помощью шунта в разрядной цепи батареи конденсаторов). Сопротивление между электродами определяли по мгновенным значениям напряжения между электродами и сварочного тока.

При испытании проверялась прочность сварных образцов на отрыв (по пять образцов, полученных в одном режиме сварки). После сварки образца керамический изолятор его крышки разбивали и внутрь манжеты вставляли специальный болт. Свободный край манжеты загибали по всему периметру и плотно поджимали гайкой к головке болта. Затем хвостовики болта и основания корпуса закрепляли в противоположных зажимах разрывной машины ЦД-10.

На поперечных разрезах сварных образцов готовили микрошлифы для металлографических и микрорентгеноспектральных исследований.

Сварку корпусов производили одним импульсом тока, двумя импульсами с паузой между ними и двумя импульсами без паузы. Данные по режимам сварки, соответствующей им настройке машины

МРК-16003 и результаты испытаний сварных образцов представлены в табл. П.1.

Таблица П.1

Номер режима сварки	Параметры										Постоянные параметры машины
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, кА$	$I_2, кА$	$T_1, с$	$T_2, с$	$T, с$	$P, даН$	$\Delta P, даН$	$W, \%$	
1		280		63				15	33	220	$F_{эл}=2600 \text{ даН}$ $C=380\,000 \text{ мкФ}$ $n=49$
2		300		69				230	268	117	
3		320		76				475	375	79	
4		340		81				420	214	51	
5	160		30					1400	149	11	$F_{эл}=2600 \text{ даН}$ $C=380\,000 \text{ мкФ}$ $n=40$
6	220		48		0,040			1015	428	42	
7	280		61					1030	490	47	
8	300		70	91	0,040		60	910	420	46	
9	320		74					910	560	62	
10	340		80					1040	545	52	
11	380		91					1290	192	15	
12	220		36	76				590	240	41	$F_{эл}=2600 \text{ даН}$ $C_1=220\,000 \text{ мкФ}$ $C_2=160\,000 \text{ мкФ}$ $n=40$
13	240		38	79		0,025	0,035	545	224	41	
14	280		47	87				730	78	11	
15	340	380	59	91				760	162	21	
16	220		36	76				690	240	35	
17	240		38	78				460	123	27	
18	280		47	86	0,030	0,045	0,060	485	160	33	
19	340		59	89				355	240	68	
20	220		36	72				340	183	54	$F_{эл}=2600 \text{ даН}$ $C_1=220\,000 \text{ мкФ}$ $C_2=160\,000 \text{ мкФ}$ $n=40$
21	240		38	75				185	156	84	
22	280		47	79		0,090	0,100	206	83	40	
23	340		59	80				14	31	220	

Примечание: U_1 (U_2) — напряжение на конденсаторах при подогреве (при сварке); I_1 (I_2) — подогревный (сварочный) импульс тока; T_1 — длительность подогревного импульса тока от нуля до амплитуды; T_2 — длительность сварочного импульса тока от нуля до амплитуды, при двухимпульсной сварке без паузы между импульсами; T — время между амплитудами импульсов; T — время задержки включения I_2 относительно I_1 ; P — среднее арифметическое значение прочности партий сварных образцов, полученных в одном режиме (средняя прочность); $\Delta P = \sqrt{\frac{\sum (P - P_i)^2}{n - 1}}$ — среднее квадратическое значение разброса прочности отдельных сварных образцов P_i данной партии в количестве n образцов; W — коэффициент вариации, характеризующий разброс прочности образцов и, следовательно, стабильность данного режима сварки; $F_{эл}$ — усилие сжатия электродов; $C = C_1 + C_2$ — емкость батарей конденсаторов; C_1 (C_2) — емкость первой (второй) секции батарей; n — коэффициент трансформации сварочного трансформатора.

Сварка корпусов одним импульсом тока (режимы 1—4 в табл. П.1) при отсутствии выплесков обеспечивала среднюю прочность сварных соединений не более 480 даН, причем разброс прочности отдельных об-

разцов был весьма большим. На одном режиме сварки получались образцы прочностью до 1000 даН и образцы, разрушавшиеся уже при подготовке их к испытанию на отрыв. При сварке токами более 75 кА возникали выплески и снижалась средняя прочность образцов.

При двухимпульсной сварке (режимы 5—11) исследовали влияние подогревного импульса тока, при этом сварочный импульс оставался постоянным. После разряда батареи конденсаторов, в результате которого формировался первый (подогревный) импульс тока, осуществлялся заряд батареи до другого напряжения и затем разряд ее для формирования второго (сварочного) импульса тока. В паузе между импульсами, необходимой для повторного заряда батареи, свариваемые детали находились под сварочным давлением и полностью остывали после прекращения подогревного импульса тока.

Прочность P образцов существенно изменялась в зависимости от подогревного тока, однако во всех случаях она была значительно выше, чем при одноимпульсной сварке. Последнее обусловлено более интенсивным развитием физического контакта и диффузионных процессов вследствие более продолжительного и мощного нагрева при двухимпульсной сварке.

При подогревном токе, равном по амплитуде примерно 30% сварочного тока, осадка рельефа практически не происходила (не наблюдалось перемещение электрода) и, следовательно, не увеличивалась площадь геометрического контакта в месте сварки. Однако сопротивление между электродами $r_{эз}$ заметно уменьшалось, что можно объяснить образованием равномерного сварочного контакта по всему периметру рельефа при прохождении подогревного импульса тока. В результате при сварочном импульсе обеспечивалась равномерность нагрева и прочности по всему периметру, что обуславливало значительное повышение средней прочности образцов ($P=1400 \text{ даН}$) по сравнению с одноимпульсной сваркой ($P=480 \text{ даН}$).

Увеличение подогревного тока в пределах 30—50% сварочного приводило к расширению площади геометрического контакта за счет смятия рельефа. Об этом свидетельствовали увеличение перемещения электрода и снижение сопротивления $r_{эз}$ при подогреве. При этом плотность тока и тепловыделение в месте сварки относительно уменьшались при сварочном импульсе и, следовательно, снижалась прочность P . Разброс прочности образцов возрастал. Сварка сопровождалась выплесками, число и интенсивность которых уменьшались с увеличением подогревного тока.

Дальнейшее повышение подогревного тока в пределах 50—85% сварочного увеличило смятие рельефа до 50—70% суммарного смятия. Относительное приращение площади сварочного контакта при этом уменьшалось, в результате чего плотность сварочного тока, деформация и ширина зоны соединения изменялись незначительно. Вследствие этого практически стабилизировались прочность P и разброс прочности отдельных образцов. Число выплесков сокращалось, и при подогревных токах, равных 70—85% сварочного, выплески не наблюдались.

При подогревных токах более 85% сварочного происходило почти полное смятие рельефа, что было видно из осциллограмм перемещения электрода, и значительное уменьшение $r_{эз}$ после первого импульса. Прочность P возрастала, что обуславливалось повышением тепловыделения, о чем свидетельствовало увеличение глубины диффузии кобальта из ковара (манжеты) в сталь и никелевое покрытие (кольцо). Вновь наблюдались выплески, но уже при прохождении подогревных импульсов тока.

При сварке двумя импульсами без паузы батарея конденсаторов машины МРК-16003 была разделена на две секции, которые одновремен-

но заряжались до разных напряжений (режимы сварки 12—23). Поочередный разряд секций через регулируемое время задержки позволял получать два импульса тока с разными амплитудами. При этом амплитуда второго сварочного импульса зависела не только от напряжения второй секции, но также и от напряжения первой секции и времени задержки включения второго импульса, так как последний включался при разных значениях тока первого импульса. Амплитуда второго импульса возрастала с увеличением напряжения первой секции и с уменьшением времени задержки.

При испытании проверялась зависимость прочности P и коэффициента вариации W от подогревного тока I и времени задержки включения сварочного тока T . С увеличением времени T при постоянном токе I прочность образцов резко падала, так как при этом снижался сварочный ток.

Увеличение I при постоянном $T=0,035$ с приводило к возрастанию и стабилизации P . Величина W и ее изменение на этом участке оказались наименьшими по сравнению со всеми другими изученными случаями как одноимпульсной, так и двухимпульсной сварки. Изменение I в тех же пределах при $T=0,060$ с снижало P и увеличивало W , а при $T=0,100$ с — резко уменьшало P и еще более резко увеличивало W по сравнению с первым случаем ($T=0,035$ с). Во всех случаях сварки двумя импульсами тока без паузы выплески не наблюдались.

Металлографический анализ сварных образцов показал картину типичного сварного соединения: рельеф сильно деформирован, никелевое покрытие сохранилось по центру рельефа и нарушилось на периферии соединения. Оплавленный металл в зоне сварки отсутствовал. При большом увеличении по границам зерен кобальта наблюдаются следы оплавления. Микрорентгеноспектральный анализ обнаружил диффузию кобальта из кобальта (манжеты) в никелевое покрытие на стали (кольцо) и частично в сталь. Перераспределение кобальта в зоне сварки свидетельствует о наличии металлической связи между свариваемыми деталями. Сварные образцы с наибольшими глубиной диффузии и количеством протифундированного кобальта оказались наиболее прочными при испытаниях на отрыв.

Результаты испытаний показали, что двухимпульсная сварка корпусов мощных вентиляторов на конденсаторной машине обеспечивает более высокую и стабильную среднюю прочность изделий ($P \geq 760$ даН) по сравнению с одноимпульсной сваркой ($P \leq 480$ даН). Кроме того, при двухимпульсной сварке предотвращаются выплески.

Наиболее оптимальными являются режимы двухимпульсной сварки без паузы, в которых подогревный ток по амплитуде равен 55—65% сварочного и сварочный ток включается в начале спада подогревного тока (режимы 14, 15). При несколько меньшей средней прочности полученных на этих режимах образцов по сравнению с наилучшими режимами двухимпульсной сварки с паузой (режимы 8, 9) они обеспечивают наименьший разброс образцов по прочности и большую производительность машины при меньшей затрачиваемой на сварку энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 585011 (СССР). Сварочная конденсаторная машина с реверсированием сварочного тока/ А. Б. Белов. Оpubл. в Б. И., 1977, № 47.
2. А. с. № 531693 (СССР). Способ управления сварочной конденсаторной машиной/ А. Б. Белов, Н. Г. Бреслав, В. К. Клименко, О. В. Самсонов. Оpubл. в Б. И., 1976, № 38.
3. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов: Пер. с англ./ Под ред. И. В. Антика — М.: Энергия, 1969. — 280 с.
4. Белов А. Б., Дузенко Ю. Г., Синицына Т. В. Применение элементов «Логика-Т» в системах управления машинами контактной сварки. — Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка, 1976, вып. 5(38), с. 7—10.
5. Белов А. Б., Заходякина Н. А., Смирнов Н. Я. Исследование температурного режима тиристоров при коммутации тока разряда в сварочных конденсаторных машинах. — Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка, 1978, вып. 5(50), с. 2—4.
6. Использование мостового двухтактного последовательного инвертора на тиристорах в конденсаторной машине для шовной сварки/ И. В. Пентегов, Д. А. Шейковский, Е. П. Стемковский, С. Н. Мещеряк. — Проблемы технической электродинамики, 1972, № 35, с. 32—35.
7. Комарчев А. И. Схема разрядной части контактной конденсаторной машины с регулируемым при сварке током. — Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка, 1974, вып. 4(25), с. 3—5.
8. Пентегов И. В. Исследование электромагнитных процессов в конденсаторных сварочных машинах/ Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. — Киев: 1963 (ИЭС имени Е. О. Патона).
9. Рыськова З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки. — 2-е изд. — Л.: Энергия, 1975. — 279 с.
10. Унифицированные функциональные блоки для сварочных конденсаторных машин/ А. Б. Белов, К. В. Морев, А. А. Серов, Г. Н. Худик. — Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка, 1975, вып. 1(28), с. 10—13.
11. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Сахаров Ю. В. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. — М.: Энергия, 1975. — 510 с.
12. Montfoort J. E. Discharge-circuit formula for the evaluation of capacitor-bank discharges. — Electronic engineering, 1968, April, p. 194—196.