

ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

О. Н. БОКШТЕЙН
А. М. КАНИН

**ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ
КОНТАКТНОЙ
СВАРКИ
ПОСТОЯННЫМ
ТОКОМ**



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАД 1976

6П4.3
Б78
УДК 621.791.76.03

Рецензент Л. В. Глебов

Бокштейн О. Н. и Канин А. М.

Б78 Оборудование для контактной сварки постоянным током. Л., «Энергия», 1976.

104 с. с ил. (Электросварочное оборудование).

В брошюре рассмотрена работа силовой электрической схемы и схемы управления машин постоянного тока с выпрямителем на мощных неуправляемых кремниевых вентилях на вторичной стороне и управляемыми вентилями на первичной стороне трехфазного трансформатора. Описано устройство отечественных машин и изложены основные особенности их наладки и эксплуатации.

Брошюра предназначена для инженерно-технического персонала, занимающегося проектированием, эксплуатацией и наладкой оборудования для контактной сварки, а также может быть полезна наладчикам этого оборудования.

Б $\frac{30307-166}{051(01)-76}$ 80-76

6П4.3

© Издательство «Энергия», 1976

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для контактной сварки металлов и сплавов широкой номенклатуры и с большим диапазоном толщин используются токи до 200 кА при напряжении на деталях 0,5—2,5 В. Электрическая часть контактных машин представляет собой активно-индуктивную цепь с источником питания низкого напряжения. Индуктивность цепи зависит от размеров рабочего пространства машины — вылета электродов и раствора сварочного контура — и определяется в основном индуктивностью сварочного контура, которая достигает весьма больших значений. Это обуславливает чрезвычайно низкий коэффициент мощности контактных машин (до 0,2) при питании сварочного контура переменным током промышленной частоты.

Для снижения потребляемой мощности, повышения коэффициента мощности и создания равномерной нагрузки фаз питающей сети целесообразно питать сварочный контур постоянным током, получаемым путем выпрямления переменного тока силовыми полупроводниковыми вентилями на стороне низкого напряжения понижающего трансформатора.

До разработки указанных вентилях в отечественной и зарубежной промышленности было создано оборудование для контактной сварки алюминиевых сплавов, в котором питание сварочного контура осуществляется током низкой частоты. При этом преобразование частоты производится трехфазным инверсионным преобразователем на стороне высокого напряжения (первичной стороне) однофазного понижающего (сварочного) трансформатора [5, 8]. Этот класс оборудования с развитым сварочным контуром позволяет получать большие сварочные токи при умеренном потреблении мощности, высоком коэффициенте мощности и равномерной нагрузке трехфазной пи-

тающей сети. Сварка алюминиевых сплавов осуществляется одной полуволной тока длительностью в наиболее мощных машинах до 0,5 с. Необходимость трансформирования полуволн напряжения указанной длительности потребовала создания чрезвычайно больших по массе магнитопроводов трансформаторов. Для чередования полярности полуволн напряжения в машинах используются два выпрямителя или выпрямитель и инвертор, что усложняет силовую электрическую часть машин и предъявляет повышенные требования к силовым управляемым вентилям и схеме управления.

Разработка и освоение выпуска силовых полупроводниковых вентилях позволили создать контактные машины с выпрямлением тока на стороне низкого напряжения.

К настоящему времени промышленностью освоено производство значительного числа типоразмеров контактных машин постоянного тока для точечной и шовной сварки с диапазоном токов 16—160 кА.

В технической литературе описываются в основном принципы работы машин постоянного тока для контактной сварки. В специальной периодической литературе рассматриваются некоторые вопросы теории и особенности нового оборудования. В контактных машинах используются низковольтные управляемые выпрямители, имеющие существенные отличия от применяемых в других отраслях промышленности. Ввиду этого проектирование и обслуживание оборудования требуют понимания особенностей работы этих выпрямителей, а также знания основных конструктивных принципов и схем управления машин. Данная брошюра освещает указанные вопросы в достаточно популярной форме.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Авторы

Глава первая

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Особенности работы выпрямителя в контактных машинах

Для условий работы выпрямителя контактных машин характерны: чрезвычайно низкие напряжения, весьма большие токи, повторно-кратковременный режим включения с ПВ до 50% и длительностью включения от сотых долей секунды до 20 с, широкий диапазон регулирования значения выпрямленного тока и его формы.

При больших токах (десятки и сотни килоампер) постоянная составляющая выпрямленного напряжения на нагрузке не превышает 3 В. Ввиду этого на энергетические характеристики низковольтного выпрямителя могут оказать решающее влияние падение напряжения на вентилях и снижение выпрямленного напряжения при коммутации фазных токов. Выпрямители контактных машин комплектуются силовыми кремниевыми вентилями. Падение напряжения на кремниевом вентиле соизмеримо со значением выпрямленного напряжения, поэтому нецелесообразно применять выпрямители мостового типа с последовательным соединением вентилях. В этих условиях оптимальными являются выпрямители параллельного типа с нулевой точкой — простые и сложные, при которых в два раза уменьшаются расход вентилях и потери на них. Весьма большие токи контактных машин требуют значительного количества параллельно соединенных вентилях в каждой фазе выпрямителя. В связи с этим для выпрямления тока применяются

неуправляемые вентили, а управление током осуществляется на первичной стороне трансформатора управляемыми вентилями.

Падение напряжения при коммутации фазных токов определяется индуктивностью рассеяния трансформатора, цепей параллельно соединенных вентилях и токоподводов, входящих в цепи фаз выпрямителя. Обмотки трансформаторов контактных машин выполняются дисковыми чередующимися. Благодаря этому первичные и вторичные обмотки каждой фазы хорошо связаны между собой, что обеспечивает весьма низкую индуктивность рассеяния трансформатора. Практически невозможно выполнить токоподводы и цепи вентилях фаз выпрямителя с высоким коэффициентом взаимной индукции между фазами. Ввиду этого для снижения индуктивности цепи каждой фазы выпрямителя группа параллельно соединенных вентилях выполняется в виде отдельного блока специальной конструкции с прямым и обратным токоподводами, при этом нулевая точка схемы переносится на выход выпрямителя.

2. Схемы выпрямителей с вентильным управлением на первичной стороне трансформатора

Выбор схемы выпрямителя на вторичной стороне и схемы включения управляемых вентилях на первичной стороне трансформатора зависит от совокупности многих факторов. К ним относятся: технологические требования к волнистости кривой выпрямленного тока (к допустимой глубине пульсаций); размеры рабочего пространства машины — вылет электродов и раствор сварочного контура, определяющие индуктивность цепи нагрузки выпрямителя; энергетические показатели — потребляемая мощность и коэффициент мощности; количество управляемых вентилях на первичной стороне и условия их работы; простота и надежность работы выпрямителя и системы управления с учетом возможной асимметрии импульсов управления, если принимать во внимание эксплуатацию в цеховых условиях.

Контактные машины с большим вылетом электродов и раствором сварочного контура, предназна-

ные для сварки крупногабаритных изделий, имеют столь большую индуктивность сварочного контура, что уже при периодичности выпрямленного напряжения $m=3$ (т. е. при использовании трехфазного нулевого выпрямителя) глубина пульсаций выпрямленного тока весьма мала и удовлетворяет технологическим требованиям к волнистости кривой выпрямленного тока. При малом рабочем пространстве машин

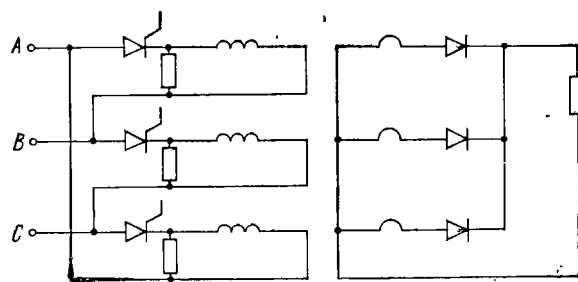


Рис. 1

индуктивность сварочного контура может оказаться недостаточной для эффективного сглаживания кривой выпрямленного тока при $m=3$. В этих случаях целесообразно иметь $m=6$, т. е. применять шестифазный выпрямитель. Кроме того, шестифазный выпрямитель целесообразно использовать в мощных машинах с целью снижения потребляемой мощности и повышения коэффициента мощности. Дальнейшее увеличение периодичности пульсаций выпрямленного напряжения ($m>6$) в контактных машинах нецелесообразно в связи с существенным усложнением выпрямителя и схемы управления.

Наиболее простым и надежным является трехфазный нулевой выпрямитель. В связи с тем что на вторичной стороне трансформатора выпрямляются полу-волны напряжения одной полярности, достаточно на первичной стороне трансформатора управлять полу-волнами напряжения также только одной полярности. Схема трехфазного нулевого выпрямителя с однотактным вентильным управлением на первичной стороне трансформатора приведена на рис. 1 [6, 8]. Первичная обмотка трехфазного трехстержне-

вого трансформатора соединена треугольником с включением в каждую фазу по одному управляемому вентилю. Управляемые вентили отпираются поочередно через 120° соответственно периодичности выпрямленного напряжения при $m=3$.

При включении управляемого вентиля к соответствующей фазе первичной обмотки подводится полувольтна линейного напряжения сети, которая трансформируется на вторичную сторону и через неуправляемые вентили данной фазы подводится к цепи сварочного контура. Продолжительность проводимости вентилей каждой фазы на вторичной стороне трансформатора составляет $2\pi/3 + \gamma$, где γ — угол коммутации при передаче выпрямленного тока с фазы на фазу.

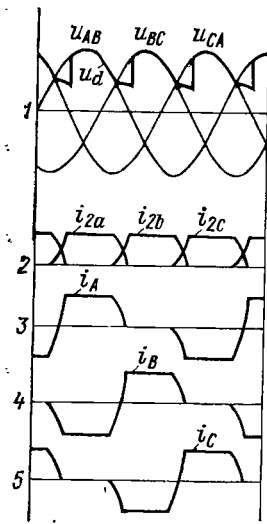


Рис. 2

Для шестифазных выпрямителей, рассматриваемые ниже, соответствуют этим же условиям. На оси 1 даны линейные напряжения сети u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} и выпрямленное напряжение u_d ; на оси 2 — вторичные фазные токи i_{2a} , i_{2b} , i_{2c} (токи неуправляемых вентилей) и первичные фазные токи i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} (токи управляемых вентилей, которые на рис. 2 не обозначены, так как по форме подобны вторичным фазным токам); на осях 3, 4, 5 — линейные токи сети i_A , i_B , i_C .

Несмотря на униполярный характер первичных фазных токов, магнитопровод трехфазного трансформатора перемагничивается за период напряжения сети. Это связано с тем, что изменения магнитного по-

Диаграммы токов и напряжений в элементах схемы выпрямителя при условии пренебрежения падением напряжения на вентилеях, намагничивающей составляющей фазных токов трансформатора и пульсациями выпрямленного тока приведены на рис. 2. При этом угол фазового регулирования $\alpha=0$. Диаграммы

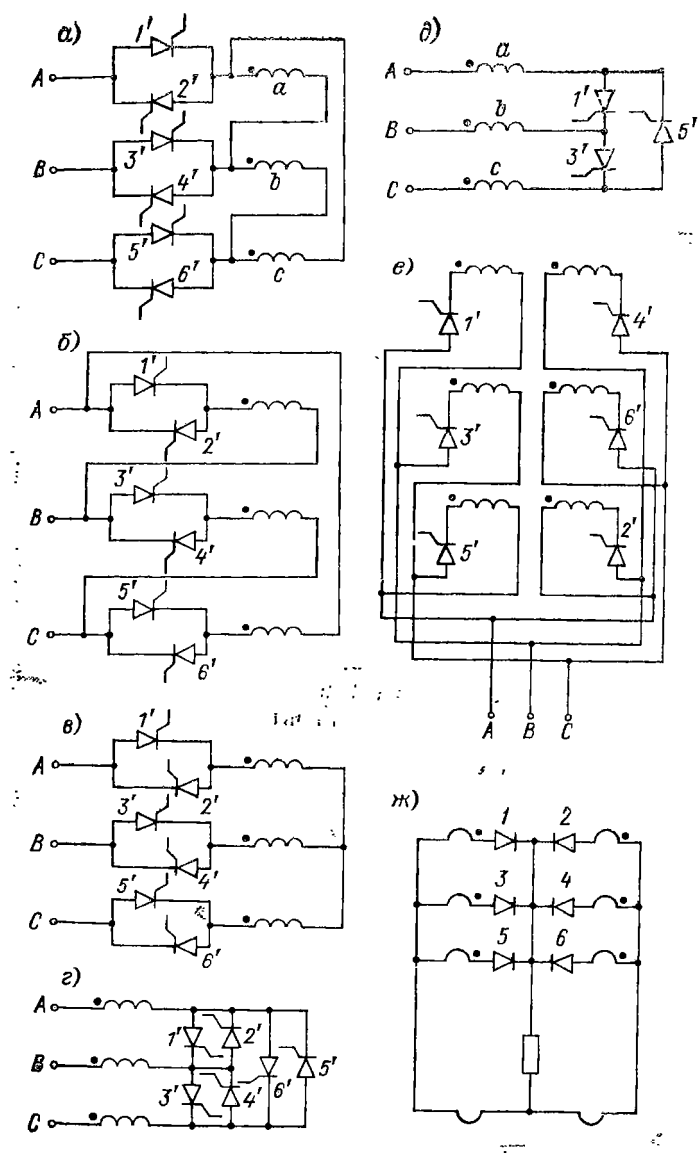


Рис. 3

тока в каждом стержне магнитопровода при работе «своей» фазы и поочередной работе двух других фаз противоположны по знаку.

В наиболее мощных машинах целесообразно применять шестифазные выпрямители, энергетически более эффективные, чем трехфазные. Оптимальными для условий низких напряжений и больших токов являются выпрямители, соединенные на вторичной стороне по схеме «две трехфазные обратные звезды» и работающие в двойном трехфазном режиме [10]. Различные варианты схем включения управляемых вентилей на первичной стороне трехфазного трансформатора и его первичных обмоток приведены на рис. 3 для шестифазного выпрямителя, включенного на вторичной стороне по схеме рис. 3,ж.

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя, первичные обмотки трансформатора которого соединены треугольником, а управляемые вентили включены в линейные провода (рис. 3,а), приведены на рис. 4. На оси 1 даны линейные напряжения сети и выпрямленное напряжение, на осях 2, 3 — токи вторичных обмоток трансформатора и неуправляемых вентилей 1—6. На оси 4 показаны токи первичных обмоток трансформатора, на осях 5—7 — линейные токи и токи управляемых вентилей 1'—6'. Во внекоммутационные интервалы на вторичной стороне ток проводят два неуправляемых вентилей — один из нечетной и один из четной звезды. На первичной стороне ток проводят одновременно три управляемых вентилей из разных групп. Каждый вентиль проводит за период ток в интервале 180°.

Амплитуда тока вентилей составляет $I_m = I_d / k_{\Delta}$, где I_d — выпрямленный ток; k_{Δ} — коэффициент трансформации при соединении первичной обмотки треугольником. Средний ток вентилей

$$I_{cp} = I_d / (3k_{\Delta}).$$

Коммутация фазных токов на вторичной стороне происходит внутри каждой звезды через 120°. Каждая коммутация происходит с момента равенства мгновенных значений линейных напряжений сети, трансформируемых во вторичные фазные обмотки.

В интервале коммутации ток проводят одновременно два коммутирующих вентиля одной звезды и один вентиль — другой. Мгновенное значение выпрямленного напряжения представляет собой полусумму напряжений двух звезд, которые сдвинуты относительно друг друга на 180° [16]. Без учета коммутации

$$u_d = \frac{\sqrt{6}}{2} U_{20} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right),$$

где U_{20} — действующее значение вторичного фазного напряжения трансформатора при холостом ходе. Кривая выпрямленного напряжения имеет шестикратную периодичность с амплитудой $\frac{\sqrt{6}}{2} U_{20}$. Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d0} = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \frac{\sqrt{6}}{2} U_{20} \cos \omega t \, d\omega t = 1,17 \frac{U_{л}}{k_{\Delta}},$$

где $U_{л}$ — действующее значение линейного напряжения.

Во время коммутации мгновенное значение выпрямленного напряжения соответствующей звезды равно полусумме напряжений коммутируемых фаз. Среднее значение выпрямленного напряжения за счет потерь на коммутацию уменьшается на величину [10].

$$\Delta U_x = \frac{3I_d x_{\Phi}}{4\pi},$$

где x_{Φ} — индуктивное сопротивление фазной цепи выпрямителя.

Коммутация тока на первичной стороне происходит через каждые 60° в вентилях, встречно-параллельно включенных в один линейный провод сети, и в четных и нечетных вентилях, включенных в два других провода, т. е. в коммутации участвуют четыре вентиля. В вентилях, включенных встречно-параллельно в один провод, ток изменяется от половины максимального значения до нуля в одном вентиле и

затем от нуля до половины максимального значения— в другом. В двух других вентилях ток изменяется от половины максимального значения до полного и от полного значения до половины. При этом решающую роль играет коммутация во встречно-параллельных

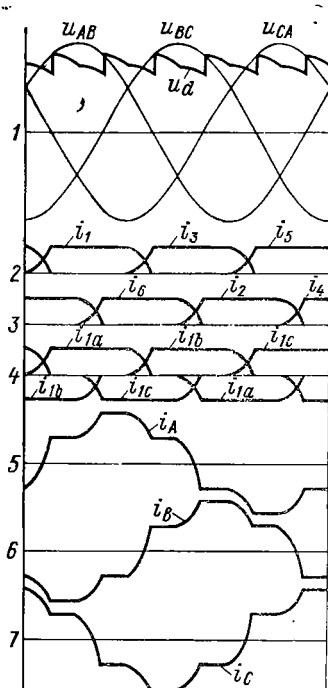


Рис. 4

вентильях, так как вступающий в работу вентиль не может включиться до тех пор, пока не выключится шунтирующий его параллельно включенный вентиль.

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя, первичные обмотки трансформатора которого соединены треугольником, а управляемые вентили — последовательно с фазными обмотками (рис. 3,б), аналогичны диаграммам на рис. 4. Исключение составляют токи управляемых вентилях, которые являются частью фазных токов, представленных на оси 4. Во внекоммутационные интервалы ток проходит по двум управляемым вентилям. Каждый вентиль проводит ток в интервале 120° без учета угла коммутации.

Амплитуда тока вентиля $I_m = I_d / (2k_\Delta)$. Средний ток вентиля $I_{cp} = I_d / 6(7k_\Delta)$. Коммутация тока на первичной стороне происходит в двух вентилях четной или нечетной группы поочередно. Два работающих управляемых вентиля во внекоммутационный интервал подводят к двум первичным фазным обмоткам трансформатора соответствующие линейные напряжения сети, которые трансформируются во вторичные обмотки. В обмотках третьей, не работающей в данное время, фазы наводятся э. д. с., равная сумме напряжений двух работающих фаз.

В симметричной трехфазной системе сумма двух линейных напряжений равна по абсолютной величине третьему напряжению, но имеет противоположную полярность. В результате этого при работе управляемых вентилях двух фаз напряжение на управляемых вентилях третьей фазы равно нулю. С момента выравнивания мгновенных значений линейных напряжений начинается коммутация фазных токов на вторичной стороне трансформатора. При этом результирующее напряжение в обмотках вступающей в работу фазы (третьей) уменьшается, что приводит к появлению прямого напряжения на очередном управляемом вентиле, которое обеспечивает возможность его включения при подаче управляющего сигнала.

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя, первичные обмотки трансформатора которого соединены звездой, а управляемые вентили включены в линейные провода сети (рис. 3, в), приведены на рис. 5. Во внекоммутационные интервалы на первичной стороне включены два управляемых вентиля — один из четной и один из нечетной группы. Включенные вентили подводят соответствующее линейное напряжение сети к двум последовательно включенным первичным фазным обмоткам трансформатора. Подводимое напряжение делится пополам между обмотками и трансформируется во вторичные обмотки тех же фаз, где выпрямляется соответствующими неуправляемыми вентилями. Напряжения в принадлежащих к разным звездам вторичных обмотках двух фаз равны по величине и совпадают по фазе, что обеспечивает их параллельную работу независимо от наличия уравнительного реактора. Кривая выпрямленного на-

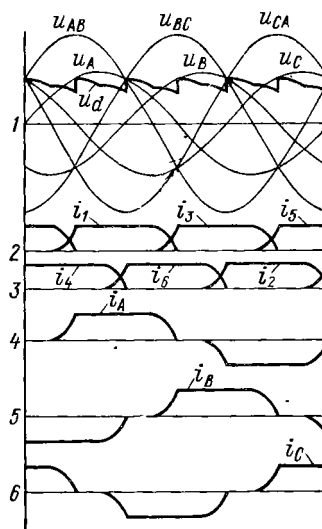


Рис. 5

пряжения имеет шестикратную периодичность с амплитудой, равной $\sqrt{2}U_{20}$. Без учета потерь на коммутацию среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d0} = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \sqrt{2}U_{20} \cos \omega t \, d\omega t = 1,35U_{20} = 1,35 \frac{U_{л}}{2k_{\gamma}},$$

где k_{γ} — коэффициент трансформации при соединении первичных обмоток звездой. При одинаковых значениях выпрямленного напряжения в сравнении с ранее рассмотренными случаями коэффициент трансформации $k_{\gamma} = \frac{k_{\Delta}}{2} \frac{1,35}{1,17}$, что соответствует $k_{\gamma} = k_{\Delta}/\sqrt{3}$.

Коммутация тока на первичной и вторичной стороне начинается с момента включения очередного управляемого вентиля. Для получения режима полного выпрямления включение очередного вентиля должно производиться в момент равенства по абсолютной величине мгновенных значений двух линейных напряжений. При этом прямое напряжение на вентиле определяется как разность одного из указанных (растущего) напряжений и половины второго, разделившегося между работающими первичными обмотками трансформатора, что составляет $\frac{\sqrt{6}}{4}U_{л}$.

Коммутация на первичной стороне происходит шесть раз за период, поочередно между двумя вентилями четной или нечетной группы. С момента начала коммутации, т. е. включения управляемого вентиля в третьем линейном проводе, к первичным обмоткам трансформатора прикладываются три фазных напряжения питающей сети. Выпрямитель переходит в режим работы, характерный для выпрямителя без управляемых вентилях на первичной стороне трансформатора [10]. Среднее значение выпрямленного напряжения за счет потерь на коммутацию уменьшается на величину $\Delta U_x = 3I_d x_{\phi} / (4\pi)$.

Без учета угла коммутации каждый управляемый вентиль проводит ток в интервале 120° за период.

Амплитуда тока управляемого вентиля

$$I_m = \frac{\sqrt{3} I_d}{2k_{\Delta}}.$$

Средний ток вентиля

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{3} I_d}{6k_{\Delta}}.$$

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя, первичные обмотки трансформатора которого соединены звездой, а шесть управляемых вентилях включены в разрыв нулевой точки (рис. 3,з) [3], аналогичны диаграммам на рис. 5, за исключением диаграмм токов управляемых вентилях. Во внекоммутационные интервалы на первичной стороне включен только один управляемый вентиль, который подводит к присоединенным к нему двум первичным фазным обмоткам трансформатора соответствующее линейное напряжение сети. Неуправляемые вентили на вторичной стороне, вторичные и первичные обмотки трансформатора работают так же, как и в выпрямителе по схеме рис. 3,в. В коммутации тока на первичной стороне участвуют один управляемый вентиль из нечетной и один из четной группы. Во время коммутации при одновременной работе двух управляемых вентилях разных групп нулевая точка звезды, образованной первичными фазными обмотками трансформатора, оказывается замкнутой. К обмоткам прикладываются фазные напряжения питающей сети. Выпрямитель переходит в режим, характерный для выпрямителя без управляемых вентилях на первичной стороне (аналогичный режиму для выпрямителя по схеме рис. 3,в). Без учета угла коммутации каждый управляемый вентиль проводит ток в интервале 60° за период. Амплитуда тока управляемого вентиля

$$I_m = \frac{\sqrt{3}}{2k_{\Delta}} I_d.$$

Средний ток управляемого вентиля

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{3}}{12k_{\Delta}} I_d.$$

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя, первичные обмотки трансформатора которого соединены звездой, а три управляемых вентиля включены в разрыв нулевой точки (рис. 3, *д*) [9], аналогичны диаграммам на рис. 5. Исключение составляют токи управляемых вентилях. Несмотря на наличие на первичной стороне только трех управляемых вентилях, выпрямитель является шестифазным. При работе одного управляемого вентиля (например, $1'$) к первичным фазным обмоткам a и b , включенным последовательно, приложено линейное напряжение u_{AB} , которое делится между ними и трансформируется во вторичные обмотки. На вторичной стороне проводят ток неуправляемые вентили 1 и 4 . В момент, соответствующий полнофазному выпрямлению, включается управляемый вентиль 3 . Прямое напряжение на нем в этот момент

$$u = u_{AC} - \frac{1}{2} u_{AB} = \frac{\sqrt{6}}{4} U_{л.}$$

Через два включенных вентиля $1'$ и $3'$ замыкается нулевая точка звезды. С этого момента к трем первичным обмоткам будут приложены три фазных напряжения питающей сети. Выпрямитель переходит в режим, характерный для выпрямителя без управляемых вентилях на первичной стороне трансформатора. Происходит коммутация тока между фазами b и c на вторичной и первичной стороне. По окончании коммутации ток на первичной стороне последовательно проводят управляемые вентили $1'$ и $3'$. Нулевая точка звезды остается замкнутой. Через 60° на вторичной стороне происходит коммутация тока в вентилях 1 и 3 . Вентиль 1 прекращает проводить ток, и соответственно выключается управляемый вентиль $1'$. Нулевая точка звезды размыкается. К первичным фазным обмоткам b и c , включенным последовательно, будет приложено линейное напряжение u_{BC} через вентиль $3'$, которое делится между обмотками и трансформируется во вторичные обмотки.

Таким образом, через 60° чередуются два внекоммутационных интервала — одновентильный на первичной стороне и двухвентильный. Среднее значение выпрямленного напряжения в обоих интервалах одинаково.

Действительно, для одновентильного интервала

$$U_{d0}^{(1)} = 1,35 \frac{U_n}{2k_Y} = 0,675 \frac{U_n}{k_Y}.$$

Для двухвентильного интервала

$$U_{d0}^{(2)} = 1,17 \frac{U_n}{\sqrt{3}k_Y} = 0,675 \frac{U_n}{k_Y}.$$

Имея в виду, что $k_Y = k_{\Delta} / \sqrt{3}$, для обоих интервалов получим:

$$U_{d0} = 1,17 \frac{U_n}{k_{\Delta}}.$$

Каждый управляемый клапан без учета угла коммутации проводит ток в течение 180° за период (60° в одновентильном интервале и по 60° в двухвентильных интервалах). Амплитуда тока управляемого клапана

$$I_m = \frac{\sqrt{3}}{2k_{\Delta}} I_d.$$

Средний ток управляемого клапана

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{3}}{4k_{\Delta}} I_d.$$

Диаграммы токов и напряжений выпрямителя с двумя трехфазными трансформаторами, первичные обмотки которых соединены треугольником (рис. 3,е), а управляемые клапаны включены по одному последовательно с каждой фазной обмоткой, аналогичны диаграммам выпрямителя по рис. 3,б. Исключение составляют диаграммы токов фазных первичных обмоток, которые нагружены током только одной полярности в интервале 120° за период, как и управляемые клапаны. Управляемые клапаны подводят к фазным первичным обмоткам двух одинаковых трансформаторов напряжения, сдвинутые относительно друг друга на 180° , в результате чего на вторичной стороне обмотки оказываются соединенными в две обратные звезды и работают параллельно на общую нагрузку. Во внекоммутационные интервалы в каждом транс-

форматоре включен один управляемый вентиль. В связи с этим прямое напряжение на очередном управляемом вентиле в момент, соответствующий полнофазному выпрямлению, равно сумме соответствующего линейного напряжения и половины э. д. с., индуцируемой в первичной обмотке фазы, вступающей в работу, и составляет

$$\frac{3\sqrt{2}}{4}U_L.$$

Шестифазные выпрямители по схеме рис. 3 аналогичны по энергетическим показателям. Различия между ними заключаются в основном в условиях работы управляемых вентилях. В табл. 1 приведены

Таблица 1

Схема выпрямителя	Количество управляемых вентилях	Амплитуда тока	Средний ток
Рис. 3, а	6	$\frac{I_d}{k_{\Delta}}$	$\frac{I_d}{3k_{\Delta}}$
Рис. 3, б	6	$\frac{I_d}{2k_{\Delta}}$	$\frac{I_d}{6k_{\Delta}}$
Рис. 3, в	6	$\frac{\sqrt{3} I_d}{2k_{\Delta}}$	$\frac{\sqrt{3} I_d}{6k_{\Delta}}$
Рис. 3, г	6	$\frac{\sqrt{3} I_d}{2k_{\Delta}}$	$\frac{\sqrt{3} I_d}{12k_{\Delta}}$
Рис. 3, д	3	$\frac{\sqrt{3} I_d}{2k_{\Delta}}$	$\frac{\sqrt{3} I_d}{4k_{\Delta}}$
Рис. 3, е	6	$\frac{I_d}{2k_{\Delta}}$	$\frac{I_d}{6k_{\Delta}}$

амплитудные и средние токи и количество управляемых вентилях. По нагрузке управляемых вентилях оптимальными являются схемы выпрямителей на рис. 3, б и е. Однако в выпрямителе по рис. 3, б затруднены условия включения управляемых вентилях, что снижает надежность работы и предъявляет повышенные требования к схеме управления. В связи с этим в первую очередь нашел применение в наибо-

лее мощных машинах выпрямитель по схеме 3,е. Дополнительным преимуществом этого выпрямителя является возможность выполнения его из двух трехфазных выпрямителей (рис. 1), используемых в машинах меньшей мощности.

Находит применение выпрямитель по схеме рис. 3,д [17]. В этом выпрямителе амплитуда тока в 1,7, а средний ток в 2,6 раза больше. Кроме того, фазовому регулированию в выпрямителе поддаются полуволны напряжения только одной полярности. Однако наличие всего трех управляемых вентилях упрощает выпрямитель и делает использование его целесообразным в некоторых случаях в машинах небольшой мощности.

3. Работа трехфазного выпрямителя

Трехфазный выпрямитель (см. рис. 1) является наиболее простым, имеет минимальное число управляемых вентилях без встречно-параллельного соединения. Благодаря этому выпрямитель обладает высокой надежностью и в первую очередь нашел применение в машинах контактной сварки. Рассмотрим работу этого выпрямителя и основные соотношения, связывающие напряжения и токи в элементах его схемы.

На диаграммах рис. 2 не читаются намагничивающая составляющая фазных токов трансформатора и падение напряжения на вентилях. В действительности падение напряжения на неуправляемых вентилях велико и должно быть учтено. Наличие намагничивающей составляющей тока вызывает принципиально различные условия погасания вентилях на вторичной и первичной стороне трансформатора. На вторичной стороне — это спад тока нагрузки до нуля в течение времени, соответствующего углу коммутации γ . В одноименной фазе на первичной стороне исчезает нагрузочная составляющая первичного тока, как показано на диаграмме рис. 2. Однако управляемый вентиль этой фазы продолжает еще некоторое время проводить ток в области отрицательного линейного напряжения за счет намагничивающей составляющей первичного тока.

Для обеспечения погасания управляемого вентиля раньше спада намагничивающего тока до нуля параллельно первичной обмотке каждой фазы включается шунтирующее активное сопротивление. Управляемый вентиль гаснет после изменения знака первичного (линейного) напряжения и достижения им значения, при котором ток шунтирующего сопротивления становится равным спадающему намагничивающему току. В машинах контактной сварки применяется фазовое регулирование выпрямленного (сварочного) то-

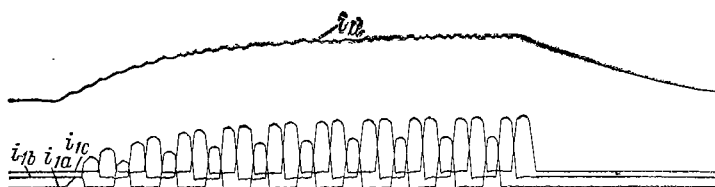


Рис. 6

ка в широком диапазоне изменения угла регулирования α . Установленное значение выпрямленного тока стабилизируется автоматическим изменением угла α при колебании напряжения сети на $\pm 10\%$ от номинального. С учетом действия стабилизации максимальный выпрямленный ток и максимальная индукция в магнитопроводе трансформатора соответствуют $\alpha=0$ при напряжении сети на 10% ниже номинального.

Таким образом, все элементы схемы выпрямителя должны быть рассчитаны на работу при малых углах регулирования.

Осциллограммы выпрямленного тока i_d и первичных фазных токов i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} приведены на рис. 6. Из-за большой индуктивности сварочного контура глубина пульсаций выпрямленного тока весьма мала.

Характерная особенность выпрямителя заключается в равновесии м. д. с. вторичного и нагрузочной составляющей первичного фазного тока трансформатора на каждом стержне магнитопровода, несмотря на однопольное выпрямление тока на вторичной сто-

не. Это вызвано однократным включением управляемых вентилях на первичной стороне трансформатора. Намагничивающая составляющая первичного фазного тока, хотя и обуславливает более длительный интервал проводимости управляемого вентиля по сравнению с неуправляемым, не влияет на значение выпрямленного напряжения. Это связано с тем, что амплитуда намагничивающего тока в данной фазе составляет незначительную часть амплитуды нагрузочной составляющей фазного тока и достигается в момент перехода соответствующего линейного напряжения через нуль, т. е. либо в процессе коммутации, либо после ее окончания. Амплитуды первичного фазного тока практически равна амплитуде нагрузочной составляющей первичного тока и определяется как $I_{1\phi m} = I_d/k$, где k — коэффициент трансформации.

В диапазоне малых углов регулирования — до $\alpha = \pi/6$ — для расчета выпрямленного тока могут быть использованы известные методы теории выпрямителей [16].

Установившееся значение выпрямленного тока определяется по формуле

$$I_d = \frac{U_{d0} - \Delta U_2 - \Delta U_1/k}{R_{к.э} + R_{э.э}}, \quad (1)$$

где $U_{d0} = 1,17U_{л \min}/k$ — выпрямленное напряжение холостого хода; $U_{л \min}$ — минимальное действующее значение линейного напряжения сети при $\alpha = 0$; ΔU_2 — падение напряжения на неуправляемых вентилях; ΔU_1 — падение напряжения на управляемых вентилях (в случае применения тиристоров не учитывается); $R_{к.э} = R_{с.к} + R_{э.ф} + x_{э}$ — сопротивление машины при коротком замыкании электродов, приведенное к стороне постоянного тока; $R_{с.к}$ — сопротивление сварочного контура постоянному току; $R_{э.ф} = R_{\phi} \left(1 - \frac{\gamma}{2 \cdot \frac{2\pi}{3}}\right) + R_d$ — эквивалентное фазное сопротивление,

приведенное ко вторичной стороне трансформатора, с учетом параллельной работы фаз в интервале коммутации и динамического сопротивления неуправляемых

мых кремниевых вентилях; R_{ϕ} — сопротивление фазы, приведенное ко вторичной стороне трансформатора; R_d — динамическое сопротивление неуправляемых вентилях; $x_s = \frac{3}{2\pi} x_{\phi}$ — эквивалентное индуктивное сопротивление, приведенное к стороне постоянного тока, определяющее падение напряжения при коммутации тока; x_{ϕ} — индуктивное сопротивление фазы, приведенное ко вторичной стороне трансформатора; $R_{s,s}$ — сопротивление деталей между электродами.

Мгновенное значение выпрямленного тока i_d , усредненное за период выпрямленного напряжения, т. е. за $1/3$ периода линейного напряжения, с момента включения выпрямителя с достаточной точностью определяется из уравнения

$$L_{c.k} \frac{di_d}{dt} + (R_{k.з} + R_{s,s}) i_d = U_{d0} - \Delta U_2,$$

где $L_{c.k}$ — индуктивность сварочного контура. Следовательно,

$$i_d = \frac{U_{d0} - \Delta U_2}{R_{k.з} + R_{s,s}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I_d (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где $\tau = \frac{L_{c.k}}{R_{k.з} + R_{s,s}}$ — постоянная времени цепи выпрямителя.

Выпрямленный ток постепенно нарастает по экспоненциальному закону от нуля до установившегося значения.

В сопротивление $R_{k.з}$, кроме активных сопротивлений, входит эквивалентное индуктивное сопротивление x_s , что снижает постоянную времени цепи выпрямителя и, следовательно, повышает скорость нарастания выпрямленного тока.

Выражение (1) представляет собой нагрузочную характеристику выпрямителя $I_d = f(R_{s,s})$. Из (1) следует, что

$$I_d = \frac{(U_{d0} - \Delta U_2) / R_{k.з}}{1 + R_{s,s} / R_{k.з}} = \frac{I_{k.з}}{1 + R_{s,s}^*},$$

где $I_{к.з}$ — ток при коротком замыкании электродов;
 $R_{э.э}^*$ — относительное сопротивление свариваемых де-
 талей.

Относительный выпрямленный ток

$$I_d^* = I_d / I_{к.з} = 1 / (1 + R_{э.э}^*).$$

Нагрузочная характеристика в относительных еди-
 ницах $I_d^* = f(R_{э.э}^*)$ приведена на рис. 7.

Токи нагрузки управляемых и неуправляемых вен-
 тилей достигают максимальных значений в области

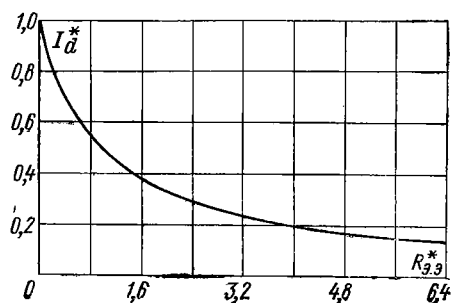


Рис. 7

углов регулирования до $\pi/6$, которая характеризуется отсутствием скачков обратного напряжения на управ-
 ляемых вентилях в момент их погасания. Напряжение
 на управляемом вентиле после его погасания сумми-
 руется из соответствующего линейного напряжения
 сети и э. д. с. первичной обмотки трансформатора,
 индуктируемой при спадании магнитного потока в со-
 ответствующем стержне магнитопровода. До погаса-
 ния управляемого вентиля характер э. д. с. данной
 фазы первичной обмотки определяется линейным на-
 пряжением в цепи этой фазы. После изменения зна-
 ка линейного напряжения э. д. с. также изменяет
 знак и имеет прямое направление по отношению
 к управляемому вентилю. По значению э. д. с. прак-
 тически равна линейному напряжению.

Как отмечено выше, после окончания коммутации
 фазных токов на вторичной стороне и нагрузочных
 составляющих токов на первичной стороне трансфор-
 матора управляемый вентиль прекращающей работу

фазы продолжает проводить ток в отрицательной области линейного напряжения за счет намагничивающей составляющей тока. При этом магнитный поток в стержне магнитопровода этой фазы и намагничивающий ток падают, а индуцируемая э. д. с. растет соответственно росту мгновенных значений отрицательного линейного напряжения. Так как э. д. с. равна по значению линейному напряжению и имеет прямое направление для управляемого вентиля, то в момент его погасания напряжение на вентиле равно

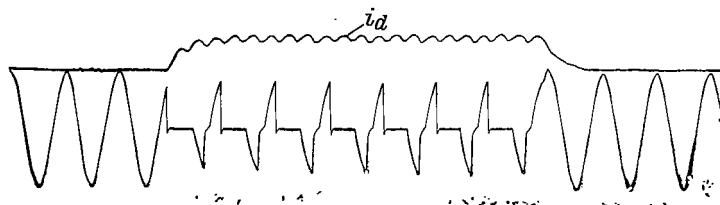


Рис. 8

нулю, что и обуславливает отсутствие скачка обратного напряжения.

После погасания управляемого вентиля магнитный поток в рассматриваемом стержне магнитопровода нарастает в отрицательном направлении под действием линейного напряжения работающей фазы. В обмотке прекратившей работу фазы индуцируется отрицательная э. д. с., которая имеет прямое направление для управляемого вентиля. В связи с этим обратное напряжение нарастает постепенно, а его амплитуда становится меньше амплитуды линейного напряжения сети. Осциллограмма напряжения на управляемом вентиле приведена на рис. 8. Указанный характер изменения обратного напряжения на управляемых вентилях в области максимальных токов нагрузки создает благоприятные условия работы управляемых вентилях в схеме выпрямителя и повышает ее надежность.

Полная мощность, потребляемая выпрямителем из трехфазной сети,

$$P = 1,21 \frac{U_{л}}{U_{л \min}} I_d^2 \left(R_{к.с} + R_{э.э} + \frac{\Delta U_2}{I_d} \right).$$

При больших углах регулирования, начиная с $\alpha > \pi/6$, режим работы выпрямителя существенно отличается от режима при малых α . В диапазоне $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ период выпрямленного напряжения и тока состоит из двух интервалов времени — одноventильного интервала на вторичной и первичной стороне длительностью $2\pi/3 - \gamma$ и двухventильного интервала на вторичной и первичной стороне (интервала коммутации фазных токов) длительностью γ . При этом в обоих интервалах м. д. с. вторичной и первичной обмоток уравниваются на каждом стержне магнитопровода трансформатора. При $\alpha > \pi/6$ в периоде выпрямленного напряжения имеются интервалы, характеризующиеся отсутствием равновесия м. д. с. на каждом стержне. Рассмотрим режимы выпрямителя при больших α . Выпрямленный ток непрерывен в связи с достаточно большой индуктивностью L_d нагрузки выпрямителя — сварочного контура.

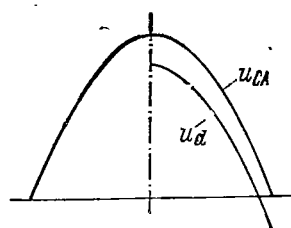


Рис. 9

В одноventильном интервале на вторичной и первичной стороне мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d уменьшается быстрее мгновенного значения синусоидального линейного напряжения в цепи включенной фазы u_{cA} (допустим, фазы c). Это вызвано падением напряжения ΔU_2 в полупроводниковом вентиле, которое составляет значительную часть вторичного напряжения трансформатора (рис. 9). Соответственно, выпрямленное напряжение проходит через нуль (изменяет знак) раньше, чем линейное напряжение.

На стороне выпрямленного тока

$$u_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt},$$

где i_d — мгновенное значение выпрямленного тока; R_d — сопротивление постоянному току сварочного контура. С течением времени по мере уменьшения мгновенного значения выпрямленного напряжения (ввиду снижения мгновенного значения линейного

напряжения) начинается некоторый спад выпрямленного тока и соответственно первичного фазного тока. Э. д. с. самоиндукции изменяет знак, стремясь поддержать выпрямленный ток. При $u_d = 0$

$$R_d i_d = -L_d \frac{di_d}{dt}.$$

При $u_d < 0$ э. д. с. самоиндукции по абсолютной величине становится больше активного падения напряжения, однако возврата энергии в сеть еще не происходит, так как линейное напряжение $u_{CA} > 0$.

По мере дальнейшего уменьшения выпрямленного напряжения растет э. д. с. самоиндукции, т. е. ускоряется спад выпрямленного тока. Э. д. с., поддерживая выпрямленный ток, стремится развить его по ветвям фаз a и b на вторичной стороне трансформатора, выключенных с первичной стороны. Ток в этих фазах может появиться только при условии, когда положительное напряжение на неуправляемых вентилях достигнет значения порогового напряжения полупроводникового вентиля ΔU_2 . Магнитный поток стержня магнитопровода включенной фазы, определяемый линейным напряжением, распределяется по стержням магнитопроводов выключенных с первичной стороны фаз. Напряжение на неуправляемых вентилях этих фаз является суммой выпрямленного напряжения и э. д. с. e_{2a} , e_{2b} , индуцируемых в соответствующих вторичных обмотках. Пока линейное напряжение $u_{CA} > 0$, э. д. с. $e_{2a} < 0$, $e_{2b} < 0$. После изменения знака линейного напряжения $e_{2a} > 0$, $e_{2b} > 0$.

Принимая равномерное распределение потока по стержням магнитопроводов выключенных фаз ($e_{2a} = e_{2b}$), получаем условие проводимости фаз a и b на вторичной стороне трансформатора:

$$-u_d + e_{2a} = -L_d \frac{di_d}{dt} - R_d i_d + e_{2a} \geq \Delta U_2.$$

Развитие тока в этих фазах начинается с момента прохождения через нуль линейного напряжения u_{CA} в цепи включенной фазы c . При этом одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне сменяется трехвентильным на вторичной и одновентильным интервалом на первичной стороне. Он может быть

назван интервалом гашения — шунтирования тока и характеризуется тем, что при некотором спаде выпрямленного тока на вторичной стороне трансформатора проводят ток три фазы, а на первичной стороне включена через управляемый вентиль только работающая фаза. На рис. 10 приведены направления токов в схеме выпрямителя для интервала гашения —

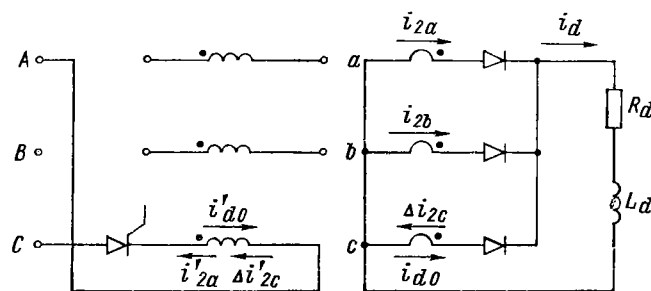


Рис. 10

шунтирования тока. Вторичный ток фазы c можно представить как

$$i_{2c} = i_{2c0} - \Delta i_{2c},$$

где Δi_{2c} — мгновенное значение приращения тока (переменная составляющая); $i_{2c0} = i_{d0}$ — начальное значение фазного, т. е. выпрямленного, тока интервала, которое равно конечному значению выпрямленного тока предыдущего интервала — одновентильного на вторичной и первичной стороне. Начальные значения вторичных токов фаз a и b равны нулю. Первичный ток фазы c можно представить как

$$i_{1c} = i'_{2c0} - \Delta i_{1c},$$

где $i'_{2c0} = \frac{1}{k} i_{2c0} = \frac{1}{k} i_{d0} = i'_{d0}$ — начальное значение

вторичного тока, приведенного к первичной стороне; Δi_{1c} — приращение тока как результат трансформаторной связи первичной обмотки включенной фазы со вторичными обмотками трех фаз. Соотношения токов определяются из условия равенства нулю м. д. с.

В замкнутых контурах, связывающих стержни магнитопровода трехфазного трансформатора:

$$\begin{aligned} i_{2a}\omega_2 - i_{2b}\omega_2 &= 0; \\ i_{2a}\omega_2 + \Delta i_{2c}\omega_2 - \Delta i_{1c}\omega_1 &= 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} i_{2a} &= i_{2b}; \\ \Delta i_{1c} &= \frac{1}{k} (\Delta i_{2c} + i_{2a}). \end{aligned}$$

Следовательно, приращение первичного тока Δi_{1c} имеет две составляющие, одна из которых $\Delta i'_{2c} = \frac{1}{k} \Delta i_{2c}$ — результат трансформаторной связи обмоток включенной фазы, а другая

$$i'_{2a} = \frac{1}{k} i_{2a} = \frac{1}{k} i_{2b}$$

— результат трансформаторной связи первичной обмотки включенной фазы со вторичными обмотками двух других фаз. Таким образом, первичный ток включенной фазы

$$i_{1c} = \frac{1}{k} (i_{d0} - \Delta i_{2c} - i_{2a})$$

падает быстрее ее вторичного тока. Разность приведенных токов на стержне включенной фазы $i_{2c} - ki_{1c} = i_{2a}$, откуда $i_{2c} = ki_{1c} + i_{2a}$.

Учитывая, что $i_{2c} + 2i_{2a} = i_d$, получаем:

$$i_{1c} = \frac{1}{k} (i_d - 3i_{2a}).$$

Мгновенное значение мощности, возвращаемой в сеть,

$$\frac{1}{k} u_{CA} (i_d - 3i_{2a}).$$

Следовательно, в связи с шунтированием выпрямленного тока во вторичных обмотках фаз, выключенных с первичной стороны, в сеть возвращается уменьшенная энергия, что снижает глубину пульсаций вы-

прямоугольного тока и поддерживает на достаточно высоком уровне коэффициент мощности выпрямителя при больших углах регулирования. Условие погасания управляемого вентиля

$$i_{1c} = \frac{1}{k} (i_d - 3i_{2a}) = 0,$$

откуда $i_{2a} = i_{2b} = \frac{1}{3} i_d$, а следовательно, $i_{2c} = \frac{1}{3} i_d$.

Таким образом, управляемый вентиль гаснет в момент полного выравнивания вторичных токов трех фаз, и прекращается связь выпрямителя с сетью. Характерная особенность интервала гашения — шунтирование тока — отсутствие равновесия м. д. с. на каждом стержне магнитопровода первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора. Неуравновешенные на стержнях м. д. с. равны друг другу и направлены навстречу. В связи с этим возникают большие потоки рассеяния, замыкающиеся по воздуху, аналогично потокам рассеяния от токов нулевой последовательности при несимметричных режимах трехфазного трансформатора.

С момента отключения выпрямителя от сети начинается интервал шунтирования тока. Выпрямленный ток равномерно распределен по трем фазам и несколько затухает, поддерживаемый э. д. с. самоиндукции сварочного контура. Потоки взаимной индукции между стержнями магнитопровода трансформатора отсутствуют, так как м. д. с. трех вторичных обмоток равны и направлены навстречу друг другу. Потоки рассеяния вторичных обмоток велики, так как нет компенсации м. д. с. на стержне магнитопровода.

Если включение очередного управляемого вентиля происходит во время интервала гашения — шунтирования тока, до погасания предыдущего вентиля, то отсутствует интервал шунтирования тока, в течение которого выпрямитель отключен от сети.

Таким образом, по мере возрастания угла регулирования следуют друг за другом три режима выпрямления: режим I ($0 \leq \alpha \leq \pi/6$) — режим максимальных токов; режим II ($\pi/6 < \alpha < \alpha_{гр}$); режим III ($\alpha > \alpha_{гр}$), где $\alpha_{гр}$ — угол регулирования (границный), при котором очередной управляемый вентиль вклю-

чается в момент погасания предыдущего. Режим I рассмотрен выше.

Рассмотрим режим III. При включении согласно заданному значению α очередного управляемого вентиля заканчивается интервал шунтирования тока и начинается интервал коммутации — трехвентильный на вторичной и одновентильный на первичной стороне трансформатора. На рис. 11 приведены направления токов выпрямителя для интервала коммутации режима III. При включении управляемого вентиля фазы

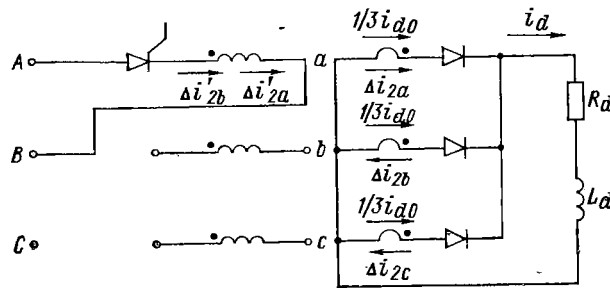


Рис. 11

a (очередного после вентиля фазы c) к ее первичной обмотке подводится напряжение u_{AB} в положительной области. Ток фазы a нарастает: в первичной обмотке от нуля, во вторичной — от начального значения. Вторичные токи фаз b и c падают от начального значения до нуля при отсутствии их первичных токов.

Начальные условия: $i_d = i_{d0}$; $i_{2c0} = i_{2a0} = i_{2b0} = \frac{1}{3} i_{d0}$;
 $i_{1c0} = i_{1a0} = i_{1b0} = 0$.

Вторичные и первичные токи можно представить следующим образом:

$$i_{2a} = \frac{1}{3} i_{d0} + \Delta i_{2a}; \quad i_{2b} = \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b};$$

$$i_{2c} = \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2c}; \quad i_{1b} = i_{1c} = 0,$$

где Δi_{2a} , Δi_{2b} , Δi_{2c} — приращения вторичных фазных токов. Соотношения токов определяются из условия равенства нулю м. д. с. в замкнутых контурах, связывающих стержни магнитопровода трехфазного трансформатора:

$$\begin{aligned} i_{2c}\omega_2 - i_{2b}\omega_2 &= 0; \\ i_{2a}\omega_2 - i_{1a}\omega_1 - i_{2b}\omega_2 &= 0, \end{aligned}$$

откуда $i_{2b} = i_{2c}$ и, следовательно, $\Delta i_{2b} = \Delta i_{2c}$,

$$i_{1a} = \frac{1}{k}(i_{2a} - i_{2b}) = \frac{1}{k}(\Delta i_{2a} + \Delta i_{2b}).$$

Таким образом, первичный ток включенной фазы нарастает быстрее ее вторичного тока и имеет две составляющие: $\Delta i'_{2a} = \frac{1}{k} \Delta i_{2a}$ — результат трансформаторной связи вторичной и первичной обмоток включенной фазы; $\Delta i'_{2b} = \Delta i'_{2c} = \frac{1}{k} \Delta i_{2b}$ — результат трансформаторной связи первичной обмотки включенной фазы со вторичными обмотками двух других фаз. По значению $i_{2a} > k i_{1a}$.

Разность токов $i_{2a} - k i_{1a} = \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b}$, откуда

$$i_{2a} = k i_{1a} + \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b}.$$

Таким образом, характерным является отсутствие равновесия м. д. с. обмоток на каждом стержне магнитопровода. Интервал коммутации закончится, когда вторичный ток фаз b и c прекратится. Уравнение

$$i_{2b} = \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} = 0$$

выражает связь длительности коммутации с начальным значением выпрямленного тока данного интервала. В момент окончания коммутации

$$\Delta i_{2a} = i_d - \frac{1}{3} i_{d0}; \frac{2}{3} i_{2a} = i_d; i_{1a} = \frac{1}{k} i_d = \frac{1}{k} i_{2a}.$$

Наступает одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне.

Таким образом, период выпрямленного напряжения состоит из четырех интервалов: одновентильного на вторичной и первичной стороне, гашения — шунтирования тока, шунтирования тока, коммутации.

При анализе работы выпрямителя приняты следующие допущения: три фазы питающей сети симметричны; выпрямленный ток непрерывен при любых значениях α ; намагничивающий ток трансформатора, ток балластных сопротивлений и обратный ток вентилей равны нулю; падение напряжения на управляемых вентилей ΔU_1 постоянно для игнитронов и равно нулю для тиристоров; падение напряжения на неуправляемых вентилей

$$\Delta u = \Delta U_2 + R_d i,$$

где ΔU_2 — пороговое напряжение полупроводникового вентиля (для мощных кремниевых вентилей, как известно, $\Delta U_2 \approx 1$ В); R_d — динамическое сопротивление вентиля, соответствующее линейной части прямой вольт-амперной характеристики; i — ток вентиля.

За положительное направление первичных i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} и вторичных i_{2a} , i_{2b} , i_{2c} фазных токов принято направление прямого тока вентилей. Положительное направление вторичных фазных э. д. с. совпадает с положительным направлением вторичных токов. За положительное направление основного потока стержня магнитопровода принято направление, соответствующее положительному направлению первичного тока. Нарастание основного потока в стержне магнитопровода создает положительную э. д. с. вторичной обмотки, расположенной на этом же стержне, и отрицательные э. д. с. вторичных обмоток, расположенных на других стержнях. Положительные первичные и вторичные фазные токи создают положительные потокосцепления соответственно с первичными и вторичными обмотками.

Для определения выпрямленного и фазных токов в каждом интервале и длительностей интервалов составляются уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров тока на вторичной стороне трансформатора и уравнения по первому закону Кирхгофа. В уравнения для контуров тока входят э. д. с. вторичных обмоток, которые определяются как произ-

водные по времени от основного потока в стержне магнитопровода. Для определения производной основного потока составляется уравнение второго закона Кирхгофа для первичной цепи включенной фазы, в которое входит производная по времени от полного потокосцепления с первичной обмоткой. Потокосцепление рассеяния с первичной обмоткой определяется исходя из полученных соотношений между первичными и вторичными токами с учетом влияния распределения токов по фазам (с точки зрения компенсации м. д. с. на стержне магнитопровода) на индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. Потокосцепление рассеяния разделяется на составляющие, связанные с уравновешенными и неуравновешенными м. д. с. на стержне магнитопровода.

В рассмотрение вводятся индуктивности рассеяния нулевой последовательности первичной и вторичной обмоток L_{1s0} и L_{2s0} .

Рассмотрим интервал гашения — шунтирования тока.

Потокосцепления рассеяния со вторичными обмотками:

$$\Psi_{2sa} = \Psi_{2sb} = L_{2s0}i_{2a}.$$

Используя соотношения токов, получаем:

$$\Psi_{2sc} = L_{2s}(i_{d0} - \Delta i_{2c}) + (L_{2s0} - L_{2s})i_{2a},$$

где L_{2s} — индуктивность рассеяния вторичной обмотки при равновесии м. д. с. на стержне магнитопровода. Известно, что $L_{2s0} \gg L_{2s}$.

В трансформаторах машин контактной сварки применяются, как указано выше, дисковые чередующиеся обмотки. В этих условиях можно считать, что неуравновешенный вторичный поток рассеяния практически полностью сцепляется также с первичной обмоткой. Таким образом, потокосцепление рассеяния с первичной обмоткой фазы c

$$\Psi_{1sc} = L_{1s}i_{1c} - L_{2s0}ki_{2a},$$

где L_{1s} — индуктивность рассеяния первичной обмотки при равновесии м. д. с. на стержне магнитопровода.

Полное потокосцепление с первичной обмоткой включенной фазы

$$\Psi_{1c} = w_1 \Phi_{0c} + L_{1s} i_{1c} - L_{2s0} k i_{2a},$$

где Φ_{0c} — основной поток стержня, замыкающийся по магнитопроводу.

Уравнение Кирхгофа для первичной цепи включенной фазы

$$u_{CA} = R_{1r} i_{1c} + \frac{d\Psi_{1c}}{dt} + \Delta U_1,$$

где R_{1r} — активное сопротивление фазы первичной обмотки трансформатора; ΔU_1 — падение напряжения на управляемом вентиле.

Из последнего уравнения с учетом выражений для первичного тока и Ψ_{1c} определяем производную $d\Phi_{0c}/dt$, а следовательно, и э. д. с. вторичных обмоток.

Используя выражения для э. д. с. и потокосцеплений рассеяния со вторичными обмотками, составляем три уравнения Кирхгофа для вторичной стороны трансформатора. В этой системе уравнений выпрямленный и фазные токи являются функциями параметров цепи, времени и начального для данного интервала значения выпрямленного тока i_{d0} . Уравнение

$$i_{1c} = \frac{1}{k} (i_{d0} - \Delta i_{2c} - i_{2a}) = 0$$

выражает связь длительности рассматриваемого интервала с начальным значением выпрямленного тока.

Рассмотрим интервал шунтирования тока. Выпрямленный и фазные токи определяются из уравнения

$$\begin{aligned} -L_d \frac{di_d}{dt} - (L_{2s0} + L_B) \frac{di_{2a}}{dt} = \\ = R_{2\phi} i_{2a} + \Delta U_2 + R_d i_d, \end{aligned}$$

где $R_{2\phi}$ — активное сопротивление фазной цепи на вторичной стороне; L_B — индуктивность блоков вентиля на фазу. При этом

$$i_{2a} = i_{2b} = i_{2c} = \frac{1}{3} i_d.$$

Начальное значение выпрямленного тока равно конечному значению тока предыдущего интервала — гашения — шунтирования тока.

Рассмотрим интервал коммутации. Потокосцепления рассеяния со вторичными и включенной первичной обмотками:

$$\begin{aligned}\Psi_{2sb} &= \Psi_{2sc} = L_{2s0} \left(\frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} \right); \\ \Psi_{2sa} &= L_{2sk} i_{1a} + L_{2s0} \left(\frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} \right) = \\ &= L_{2s} (\Delta i_{2a} + \Delta i_{2b}) + L_{2s0} \left(\frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} \right); \\ \Psi_{1sa} &= \frac{1}{k} L_{1s} (\Delta i_{2a} + \Delta i_{2b}) - \\ &- k L_{2s0} \left(\frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} \right).\end{aligned}$$

Полное потокосцепление с первичной обмоткой включенной фазы

$$\Psi_{1a} = \Psi_{1sa} + w_1 \Phi_{0a},$$

где Φ_{0a} — основной поток стержня магнитопровода включенной фазы. Из уравнения Кирхгофа для первичной цепи включенной фазы a определяем производную $d\Phi_{0a}/dt$, а следовательно, и э. д. с. вторичных обмоток. Используя выражения для э. д. с. и потокосцеплений рассеяния со вторичными обмотками, составляем три уравнения Кирхгофа для вторичной стороны трансформатора. В этой системе уравнений выпрямленный и фазные токи являются функциями параметров цепи, времени и начального для данного интервала значения выпрямленного тока. Уравнение

$$i_{2b} = i_{2c} = \frac{1}{3} i_{d0} - \Delta i_{2b} = 0$$

выражает связь длительности интервала коммутации с начальным значением тока.

Рассмотрим одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне. Этот интервал аналогичен одноименному интервалу режима I. Характерным

является равновесие м. д. с. первичной и вторичной обмоток на стержне магнитопровода включенной фазы. Следовательно,

$$i_{1c} = i'_{2c} = \frac{1}{k} i_{2c}; \quad i_{2c} = i_d;$$

$$i_{2a} = i_{2b} = 0; \quad i_{1a} = i_{1b} = 0.$$

Выпрямленный ток определяется из уравнения для контура тока на вторичной стороне

$$(R_d + R_\phi) i_d + (L_d + L_\phi) \frac{di_d}{dt} + \frac{\Delta U_1}{k} + \Delta U_2 = \frac{u_{CA}}{k}.$$

Начальное значение выпрямленного тока равно конечному значению тока интервала коммутации. Решение уравнения дает значение выпрямленного тока в функции параметров цепи, времени и начального значения этого тока.

Начальные значения выпрямленного тока и длительности интервалов определяются из условия непрерывности выпрямленного тока на границах интервалов, условий окончания интервалов и условия периодичности выпрямленного тока.

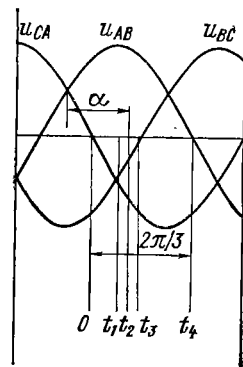


Рис. 12

Определение выпрямленного и фазных токов и длительностей интервалов при условии учета пульсаций выпрямленного тока и активного сопротивления R_ϕ фазных цепей представляет значительную сложность. Система уравнений для определения начальных значений выпрямленного тока интервалов и длительности интервалов весьма сложна и громоздка, сложный

вид имеют функции токов интервалов и, тем более, вид уравнений для средних токов. Некоторое упрощение дает пренебрежение активным сопротивлением фазных цепей, но и в этом случае решение задачи

весьма сложно и громоздко. Значительное упрощение достигается при условии постоянства выпрямленного тока за период изменения выпрямленного напряжения ($i_d = I_d = \text{const}$), что соответствует требованию бесконечно большой индуктивности цепи нагрузки выпрямителя. Практически в контактных машинах с развитым сварочным контуром $\omega L_d \gg R_d$, благодаря чему пульсации выпрямленного тока незначительны даже при больших углах регулирования.

Анализ режима III проводим при условии

$$i_d = I_d = \text{const}; R_\phi = 0.$$

За начало координат принимаем момент прохождения через нуль (в отрицательную область) линейного напряжения в цепи включенной фазы, т. е. начало интервала $(0t_1)$ гашения — шунтирования тока (рис. 12). Допустим, что включена фаза c . Линейное напряжение

$$u_{cA} = -\sqrt{2}U_{cA} \sin \omega t.$$

Вторичное напряжение фазы c

$$\frac{u_{cA}}{k} = -\sqrt{2}U_{20} \sin \omega t.$$

В интервале гашения — шунтирования тока $\Delta i_{2c} = 2i_{2a}$. В интервале шунтирования тока $(t_1 t_2)$

$$i_{2a} = i_{2b} = i_{2c} = \frac{1}{3} I_d.$$

В интервале коммутации $(t_2 t_3)$

$$\Delta i_{2b} = \Delta i_{2c} = \frac{1}{2} \Delta i_{2a}.$$

В одновентильном интервале $(t_3 t_4)$ на вторичной и первичной стороне $i_{2a} = I_d$.

В результате решения систем уравнений Кирхгофа для интервалов гашения — шунтирования тока и коммутации и составления условий окончания этих интервалов получаем два тригонометрических уравнения, связывающих три неизвестных: I_d , t_1 и t_3 . Третье урав-

нение получаем из определения постоянной составляющей выпрямленного напряжения $U_d = I_d R_d$:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt,$$

где $T = \frac{1}{\omega} \frac{2\pi}{3}$ — период выпрямленного напряжения.

Выпрямленное напряжение в каждом интервале определяем из уравнений Кирхгофа. Интегрирование проводим последовательно по всем интервалам. Так как U_d — функция пределов интегрирования, то получаем третье уравнение относительно I_d , t_1 и t_3 . Система уравнений, описывающая режим III:

$$\begin{aligned} I_d + \frac{4,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \cos \omega t_1 - \frac{4,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} &= 0; \\ \frac{1}{3} I_d + \frac{4,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \cos \left(\omega t_3 + \frac{\pi}{3} \right) - \\ - \frac{1,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) &= 0; \\ I_d - \frac{3\sqrt{2}U_{20}}{2\pi R_d} \cos \omega t_1 - \frac{3\sqrt{2}U_{20}}{2\pi R_d} \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) + \\ + \frac{\Delta U_2}{R_d} &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда определяем:

$$I_d = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{20} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right] - \Delta U_2}{\frac{x_1}{3\pi} + R_d},$$

где $x_1 = 1,5x_{2s0} + 2x_\phi + x_B + 2,5x_{1s}$ — условное индуктивное сопротивление; x_ϕ — индуктивное сопротивление фазной цепи, приведенное ко вторичной стороне; x_{1s} — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки трансформатора; x_B — индуктивное сопротивление блоков вентилях на фазу; x_{2s0} — индуктивное сопротивление нулевой последовательности вторичной обмотки трансформатора.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения при нагрузке

$$U_d = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{20} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right] - \Delta U_2}{1 + \frac{x_1}{3\pi R_d}}.$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения холостого хода выпрямителя

$$\begin{aligned} U_{d0\alpha} &= \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2} U_{20} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) d\omega t = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{20} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right] = \\ &= \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right], \end{aligned}$$

где U_{d0} — постоянная составляющая выпрямленного напряжения холостого хода выпрямителя в режиме I при $\alpha=0$. Следовательно, выпрямленный ток

$$I_d = \frac{U_{d0\alpha} - \Delta U_2}{\frac{x_1}{3\pi} + R_d}.$$

Уравнение внешней характеристики выпрямителя:

$$U_d = U_{d0\alpha} - \frac{x_1}{3\pi} I_d - \Delta U_2.$$

Внутреннее сопротивление выпрямителя, приведенное к стороне постоянного тока, составляет $x_1/(3\pi)$.

Таким образом, выражения для выпрямленного тока и уравнения внешней характеристики для режимов III и I аналогичны. Разница заключается только в значении эквивалентного индуктивного сопротивления x_2 , приведенного к стороне постоянного тока и определяющего падение выпрямленного напряжения при нагрузке.

В режиме I, как и для обычных выпрямителей, $x_2 = \frac{3}{2\pi} x_\Phi$. В режиме III $x_2 = x_1/(3\pi)$.

В режиме III с уменьшением α длительность интервала гашения — шунтирования тока $\omega t_1 = \gamma_1$ увеличивается. Следовательно, сближаются моменты включения очередного и погасания предыдущего управляемых вентилях и сокращается интервал шунтирования тока.

Угол $\alpha = \alpha_{гр}$, при котором эти два момента совпадают, т. е. $\omega t_1 = \alpha_{гр} - \pi/6$, является граничным углом,

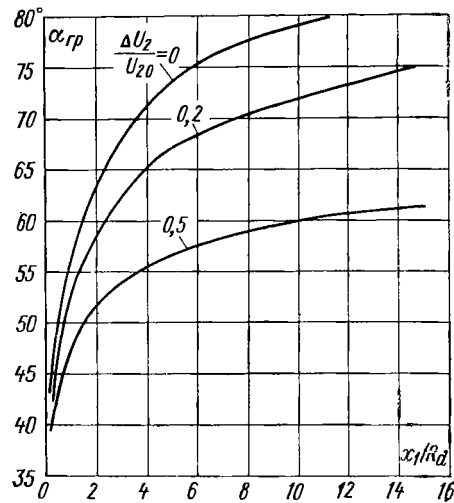


Рис. 13

разделяющим режимы III и II. При $\alpha < \alpha_{гр}$ режим III сменяется режимом II. Граничный угол определяется из выражения

$$\cos\left(\alpha_{гр} - \frac{\pi}{6}\right) = \frac{1 - \frac{x_2}{R_d} \cos\left(\alpha_{гр} + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{x_2}{R_d} \frac{\pi \sqrt{2}}{3} \frac{\Delta U_2}{U_{20}}}{1 + \frac{x_2}{R_d}}.$$

Следовательно, $\alpha_{гр} = f(x_1/R_d, \Delta U_2/U_{20})$.

На рис. 13 приведены графики зависимости граничного угла от отношения параметров для значений $\Delta U_2/U_{20} = 0; 0,2; 0,5$.

Рассмотрим режим II, соответствующий $\pi/6 < \alpha < \alpha_{\text{гр}}$. Как при анализе режима III, принимаем следующие допущения: $i_a = I_d = \text{const}$; $R_\Phi = 0$.

Допустим, в одновентильном интервале на вторичной и первичной стороне включена фаза *c*. Интервалы ($0t_1$) (рис. 12, 14) гашения — шунтирования тока для режимов II и III аналогичны.

Отличие состоит в том, что в режиме II интервал заканчивается в момент $\omega t_1 = \alpha - \pi/6$ включения очередного управляемого вентиля, до погасания предыдущего вентиля. Используя выражения для фазных токов в интервале ($0t_1$), полученные при анализе режима III, и подставляя $\omega t_1 = \alpha - \pi/6$, определяем конечные значения фазных токов в интервале, которые равны начальным значениям токов следующего интервала i_{2c0} , i_{2a0} , i_{2b0} , i_{1c0} . Полного выравнивания вторичных фазных токов к концу интервала не происходит, в связи с чем $i_{1c0} > 0$.

При включении очередного управляемого вентиля (фазы *a*) начинается интервал коммутации — трехвентильный на вторичной и двухвентильный на первичной стороне. На рис. 15 приведены токи в схеме выпрямителя для этого интервала.

Начальные условия:

$$i_{2a0} = i_{2b0}; i_{2c0} > i_{2a0}; 2i_{2a0} + i_{c0} = I_d;$$

$$i_{1c0} = \frac{1}{k} (i_{2c0} - i_{2a0}); i_{1a0} = 0;$$

$$i_{2a0} = \frac{1,5 \sqrt{2} U_{20}}{x_1} \left[1 - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right];$$

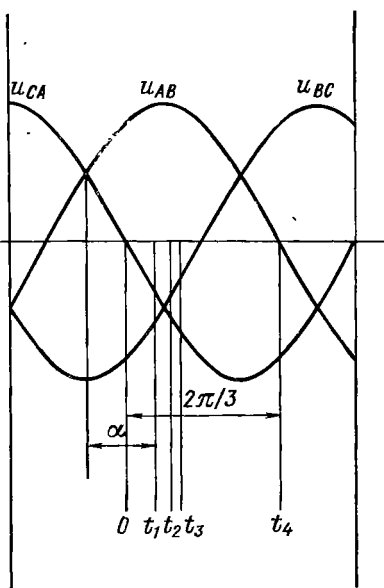


Рис. 14

$$i_{2c0} = I_d - \frac{3\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \left[1 - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right];$$

$$i_{1c0} = \frac{1}{k} \left\{ I_d - \frac{4,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \left[1 - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] \right\}.$$

Особенность интервала — на вторичной стороне ток коммутируют три фазы, на первичной — две. Вторичные токи фаз *b* и *c* падают. Вторичный ток фазы *a*

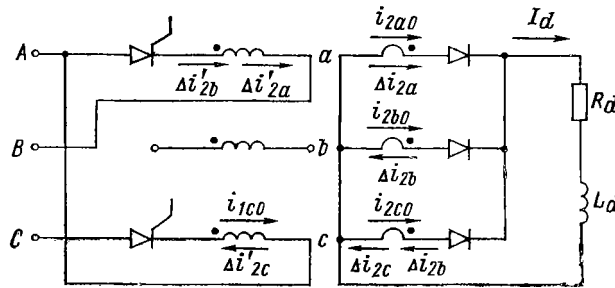


Рис. 15

нарастает. Первичный ток фазы *c* падает. Первичный ток фазы *a* нарастает.

Вторичные и первичные фазные токи можно представить следующим образом:

$$i_{2b} = i_{2b0} - \Delta i_{2b}; \quad i_{2a} = i_{2a0} + \Delta i_{2a}; \quad i_{2c} = i_{2c0} - \Delta i_{2c} - \Delta i_{2c};$$

$$i_{1c} = i_{1c0} - \Delta i'_{2c}; \quad i_{1a} = \Delta i'_{2a} + \Delta i'_{2b},$$

где $\Delta i'_{2c} = \frac{1}{k} \Delta i_{2c}$ — приращение вторичного тока фазы

c, приведенное к первичной стороне; $\Delta i'_{2b} = \frac{1}{k} \Delta i_{2b}$ —

приращение вторичного тока фазы *b*, приведенное к первичной стороне; $\Delta i'_{2a} = \frac{1}{k} \Delta i_{2a}$ — приращение вто-

ричного тока фазы *a*, приведенное к первичной стороне.

Следовательно, вторичный ток фазы *c* имеет составляющую Δi_{2c} , уравновешенную на стержне магнитопровода этой фазы, и составляющую Δi_{2b} , не уравновешенную на данном стержне магнитопровода. Первичный ток фазы *a* имеет составляющую, уравно-

вешенную на стержне магнитопровода этой фазы, и составляющую $\Delta i'_{2b}$, не уравновешенную на данном стержне магнитопровода. Вторичный ток фазы b имеет составляющую Δi_{2b} , не уравновешенную на стержне магнитопровода этой фазы.

Из уравнения Кирхгофа для токов на вторичной стороне следует

$$\Delta i_{2a} - 2\Delta i_{2b} - \Delta i_{2c} = 0.$$

Составляя уравнения Кирхгофа для вторичной и первичной стороны, определяем приращения токов:

$$\Delta i_{2b} = \frac{\sqrt{2}U_{20}}{x_4} \left[\cos \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) - \sin \alpha \right],$$

где $x_4 = 2x_{2s0} + 2x_\phi + 2x_{1s}$ (практически $x_4 \approx 2x_{2s0}$). В течение интервала коммутации, когда $\omega t > \alpha - \pi/6$, $\cos(\omega t - \pi/3) = \sin(\omega t + \pi/6) > \sin \alpha$ и, следовательно, $\Delta i_{2b} > 0$. Это соответствует условию $\alpha < \pi/2$. При $\alpha = \pi/2$ имеем $\sin(\omega t + \pi/6) < \sin \alpha$ и, следовательно, $\Delta i_{2b} < 0$. Таким образом, начиная с $\alpha = \pi/2$ режим II вообще невозможен. Приращение тока

$$\begin{aligned} \Delta i_{2a} &= \frac{\sqrt{6}U_{20}}{x_\phi} \left[\sin \omega t - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] - \\ &- \frac{x_5}{x_4} \frac{\sqrt{2}U_{20}}{x_\phi} \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) - \sin \alpha \right], \end{aligned}$$

где $x_5 = 3x_{2s0} + x_\phi + 3x_{1s}$.

Исходя из условия $\Delta i_{2c} = \Delta i_{2a} - 2\Delta i_{2b}$, определяем:

$$\begin{aligned} \Delta i_{2c} &= \frac{\sqrt{6}U_{20}}{x_\phi} \left[\sin \omega t - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] - \\ &- \frac{x_5 + 2x_\phi}{x_4} \frac{\sqrt{2}U_{20}}{x_\phi} \left[\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) - \sin \alpha \right]. \end{aligned}$$

Выпрямленное напряжение в интервале

$$u_d = \left(\frac{x_5}{x_4} - 1 \right) \sqrt{2}U_{20} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \omega t \right) - \Delta U_2.$$

В режиме II существует угол α_k , при котором режим II разделяется на два режима: IIа и IIб, отличающихся характером коммутации. Режим IIа соответствует диапазону $\pi/6 < \alpha < \alpha_k$, режим IIб — диапазону $\alpha_k < \alpha < \alpha_{гр}$.

В режиме Па в процессе коммутации сначала прекращается вторичный ток (i_{2b}) фазы (фазы b), которая отключена от сети в течение рассматриваемого периода выпрямленного напряжения. Затем одновременно прекращаются вторичный и первичный токи (i_{2c} , i_{1c}) фазы (фазы c), которая по очередности должна заканчивать работу. Коммутация окончена, гаснет соответствующий управляемый клапан, и наступает одноклапанный интервал на вторичной и первичной стороне.

Таким образом, коммутация состоит из двух интервалов: трехклапанного на вторичной и двухклапанного на первичной стороне, двухклапанного на вторичной и одноклапанного на первичной стороне.

В режиме Пб в процессе коммутации сначала прекращается первичный ток (i_{1c}) фазы (фазы c), т. е. гаснет соответствующий управляемый клапан. Затем одновременно прекращаются вторичные токи (i_{2b} , i_{2c}) двух фаз (фаз b , c), выключенных с первичной стороны. Коммутация окончена, и наступает одноклапанный интервал на вторичной и первичной стороне.

Таким образом, коммутация состоит из двух интервалов: трехклапанного на вторичной и двухклапанного на первичной стороне, трехклапанного на вторичной и одноклапанного на первичной стороне.

Рассмотрим режим Па. Условие окончания первого интервала ($t_1 t_2$ на рис. 14) коммутации — трехклапанного на вторичной и двухклапанного на первичной стороне: $i_{2b} = 0$. Следовательно,

$$\sin\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) = \sin\alpha + \frac{1,5x_4}{x_1} \left[1 - \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right].$$

Отсюда определяем t_2 — момент окончания первого интервала коммутации. Начинается второй интервал коммутации ($t_2 t_3$) — двухклапанный на вторичной и первичной стороне, который характеризуется равновесием м. д. с. обмоток на каждом стержне магнитопровода ($i_{1c} = i_{2c}/k$, $i_{1a} = i_{2a}/k$). На рис. 16 приведены токи в схеме для второго интервала коммутации режима Па. Начальные значения фазных токов этого интервала равны конечным значениям токов первого интервала коммутации.

Фазные токи во втором интервале коммутации:

$$i_{2a} = i_{2a0} + \Delta i_{2a}; \quad i_{2c} = i_{2c0} - \Delta i_{2a};$$

$$i_{1a} = \frac{1}{k} (i_{2a0} + \Delta i_{2a}) = i_{1a0} + \Delta i'_{2a};$$

$$i_{1c} = \frac{1}{k} (i_{2c0} - \Delta i_{2a}) = i_{1c0} - \Delta i'_{2a}.$$

Из уравнений Кирхгофа для контуров тока на вторичной стороне определяем приращения фазных токов и выпрямленное напряжение.

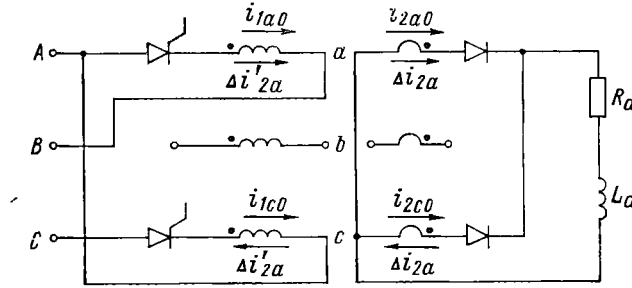


Рис. 16

Приращение фазного тока

$$\Delta i_{2a} = \frac{\sqrt{3} U_{20}}{\sqrt{2} x_{\Phi}} \left[\cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6} \right) - \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right].$$

Используя начальные значения токов, находим фазные токи в интервале. Условие окончания второго интервала коммутации ($t_2 t_3$), дающее уравнение для определения t_3 , представляет собой $i_{2c} = 0$. Выпрямленное напряжение в интервале

$$u_d = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{20} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \omega t \right) - \Delta U_2.$$

После окончания интервала ($t_2 t_3$) начинается одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне ($t_3 t_4$), который заканчивается в момент t_4 прохождения линейного напряжения u_{AB} через нуль

($\omega t_4 = 2\pi/3$). Выпрямленное напряжение в интервале

$$u_d = \sqrt{2}U_{20} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) - \Delta U_2.$$

Таким образом, период выпрямленного напряжения в режиме Па состоит из четырех интервалов: гашения — шунтирования тока ($0t_1$), первого интервала коммутации (t_1t_2), второго интервала коммутации (t_2t_3), одновентильного интервала на вторичной и первичной стороне (t_3t_4). Имеем два тригонометрических уравнения, описывающие режим Па, составленные по условиям окончания первого и второго интервалов коммутации. В эти уравнения входят три неизвестных: выпрямленный ток I_d , t_2 , t_3 . Третье уравнение получаем из определения постоянной составляющей выпрямленного напряжения $U_d = I_d R_d$:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt.$$

Интегрирование за период T выпрямленного напряжения проводим по всем интервалам. Так как U_d — функция пределов интегрирования, то получаем третье уравнение относительно I_d , t_2 , t_3 . Система уравнений в относительных единицах, описывающая режим Па:

$$\begin{aligned} \sin\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) &= \sin \alpha + \frac{1,5x_3}{x_1} \left[1 - \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right]; \\ \frac{U_d}{\sqrt{2}U_{20}} - \frac{3x_\Phi}{x_1} \frac{R_d}{x_\Phi} \left[1 - \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] - \\ &- \frac{\sqrt{3}R_d}{x_\Phi} \left[\sin \omega t_2 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right)\right] + \\ &+ \frac{x_5 + x_\Phi}{x_4} \frac{R_d}{x_\Phi} \left[\sin\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) - \sin \alpha\right] + \\ &+ \frac{\sqrt{3}R_d}{2x_\Phi} \left[\cos\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right)\right] = \\ \frac{U_d}{\sqrt{2}U_{20}} &= \frac{3}{2\pi} \left[x^* + (1 - x^*) \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) - \right. \end{aligned}$$

$$-\left(\frac{x_5}{x_4} - 1\right) \sin \alpha \left] + \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x_5}{x_4} - 1,5\right) \sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) + \right. \\ \left. + \frac{3}{4\pi} \sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{3}{2\pi} \cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{\Delta U_2}{\sqrt{2} U_{20}} \right.$$

Относительный параметр x_{Φ}/R_d — независимый. Все остальные параметры — функции отношения x_{2s0}/x_s . Таким образом,

$$\frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} = f \left(\frac{x_{2s0}}{x_s}; \frac{x_{\Phi}}{R_d}; \frac{\Delta U_2}{U_{20}}; \alpha \right).$$

Решение системы уравнений относительно постоянной составляющей выпрямленного напряжения даст семейство регулировочных характеристик $\frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} = f(\alpha)$ в режиме Па для различных значений относительного параметра x_{Φ}/R_d , изменения которого соответствуют изменению сопротивления нагрузки выпрямителя. Изменение относительного падения напряжения на неуправляемых вентилях $\Delta U_2/U_{20}$ соответствует изменению вторичного напряжения трансформатора при ступенчатом его регулировании изменением коэффициента трансформации.

Момент окончания первого интервала коммутации t_2 определяется достаточно просто из первого уравнения системы. Решение системы уравнений относительно момента t_2 и постоянной составляющей выпрямленного напряжения громоздко и сложно. Необходимо использовать ЭЦВМ.

Угол α_k , разделяющий режимы Па и Пб, определяем следующим образом. В режиме Па при увеличении α увеличивается длительность первого интервала коммутации, т. е. длительность спада тока i_{2b} , и в этом интервале быстрее падает ток i_{1c} , т. е. сближаются моменты прекращения токов i_{2b} и i_{1c} . Следовательно, при $\alpha = \alpha_k$ одновременно прекращаются токи i_{2b} и i_{1c} . При этом коммутация состоит из одного интервала ($t_1 t_2$) — трехвентильного на вторичной и двухвентильного на первичной стороне, по окончании которого в момент t_2 наступает одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне. Полагая в интервале $t_1 t_2$ равенства $i_{2b} = 0$ и $i_{1c} = 0$ при $t = t_2$, получаем систему двух уравнений относительно t_2 , I_d и α_k .

Определяем далее выпрямленный ток как $I_d = U_d/R_d$, где U_d — постоянная составляющая выпрямленного напряжения при $\alpha = \alpha_k$, т. е. в граничном режиме, при котором период выпрямленного напряжения состоит из трех интервалов: гашения — шунтирования тока ($0t_1$), интервала коммутации (t_1t_2) — трехвентильного на вторичной и двухвентильного на первичной стороне, одновентильного интервала на вторичной и первичной стороне (t_2t_3) (причем $\omega t_3 = 2\pi/3$). В результате получаем систему двух тригонометрических уравнений с двумя неизвестными α_k и t_2 :

$$\begin{aligned} \sin\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) &= \sin \alpha_k + \frac{1,5x_4}{x_1} \left[1 - \cos\left(\alpha_k - \frac{\pi}{6}\right)\right]; \\ &\left[\frac{x_\phi}{R_d} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x_5}{x_4} - 1\right) + \frac{x_5 + 2x_\phi}{x_4}\right] \sin\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6}\right) + \\ &+ \frac{x_\phi}{R_d} \frac{3}{2\pi} \cos\left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3}\right) - \sqrt{3} \sin \omega t_2 = \\ &= -\frac{x_\phi}{R_d} \frac{3}{2\pi} x^* - \frac{x_\phi}{R_d} \frac{3}{2\pi} (1 - x^*) \cos\left(\alpha_k - \frac{\pi}{6}\right) + \\ &+ \left[\frac{x_\phi}{R_d} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x_5}{x_4} - 1\right) + \frac{x_5 + 2x_\phi}{x_4}\right] \sin \alpha_k + \\ &+ \frac{x_\phi}{x_1} 4,5 \left[1 - \cos\left(\alpha_k - \frac{\pi}{6}\right)\right] - \\ &- \sqrt{3} \sin\left(\alpha_k - \frac{\pi}{6}\right) + \frac{x_\phi}{R_d} \frac{\Delta U_2}{\sqrt{2} U_{20}}. \end{aligned}$$

Из характера первого уравнения системы следует, что угол α_k ограничен по значению, так как $\sin(\omega t_2 + \pi/6) < 1$. Следовательно, $\omega t_{2\max} < \pi/3$.

Решить эту систему в общем виде относительно α_k невозможно. Необходимо использовать ЭЦВМ. В результате решения получим:

$$\alpha_k = f\left(\frac{x_\phi}{R_d}; \frac{x_{2s0}}{x_s}; \frac{\Delta U_2}{U_{20}}\right).$$

Выше было приведено уравнение для определения $\alpha_{гр}$, разделяющего режимы II (точнее, IIб) и III, из которого следует, что

$$\alpha_{гр} = f\left(\frac{x_1}{R_d}; \frac{\Delta U_2}{U_{20}}\right).$$

Так как $\frac{x_1}{R_d} = \frac{x_1}{x_\Phi} \frac{x_\Phi}{R_d}$, то, следовательно, как и α_k ,

$$\alpha_{гр} = f\left(\frac{x_\Phi}{R_d}; \frac{x_{2s0}}{x_s}; \frac{\Delta U_2}{U_{20}}\right).$$

Рассмотрим режим Пб, соответствующий диапазону $\alpha_k < \alpha < \alpha_{гр}$. Период выпрямленного напряжения со-

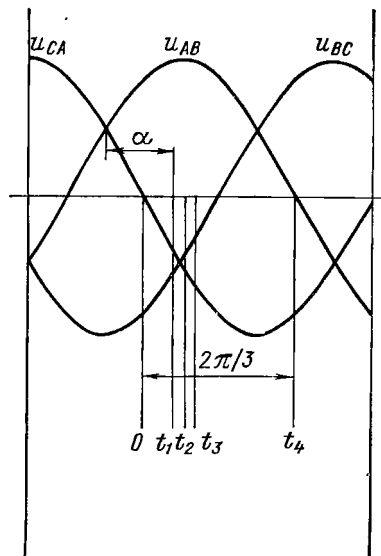


Рис. 17

стоит из четырех интервалов (рис. 17): гашения — шунтирования тока ($0t_1$), первого интервала коммутации — трехвентильного на вторичной и двухвентильного на первичной стороне (t_1t_2), второго интервала коммутации — трехвентильного на вторичной и одновентильного на первичной стороне (t_2t_3), одновентильного интервала на первичной и вторичной стороне (t_3t_4). Первый, второй и четвертый интервалы рассмотрены выше. Условие окончания первого интервала коммутации: $i_{1c} = 0$. Следовательно,

$$I_d = \frac{4,5\sqrt{2}U_{20}}{x_1} \left[1 - \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] -$$

$$-\frac{V\sqrt{6}U_{20}}{x_{\Phi}} \left[\sin \omega t_2 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] +$$

$$+\frac{x_5 + 2x_{\Phi}}{x_4} \frac{V\sqrt{2}U_{20}}{x_{\Phi}} \left[\sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6} \right) - \sin \alpha \right] = 0.$$

Уравнение выражает связь момента окончания первого интервала коммутации t_2 с выпрямленным током I_d . Второй интервал коммутации ($t_2 t_3$)

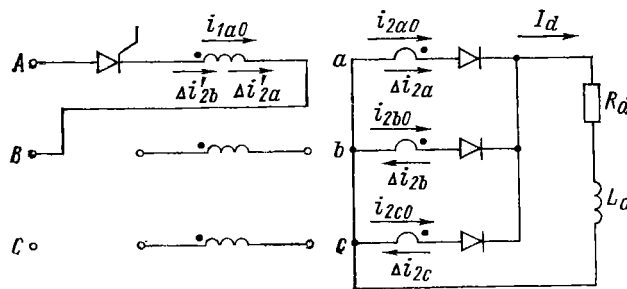


Рис. 18

(рис. 18) аналогичен интервалу коммутации режима III (см. рис. 11). Разница заключается в начальных условиях. Начальные значения фазных токов равны конечным значениям токов первого интервала коммутации. Приращения фазных токов определяем из соответствующих уравнений режима III с учетом того, что в данном режиме начальные условия соответствуют моменту $\omega t = \omega t_2$. Условие окончания интервала: $i_{2b} = i_{2c} = 0$, что дает уравнение связи t_3 с I_d . Выпрямленное напряжение в интервале

$$u_d = (1 - x^*) \sqrt{2} U_{20} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) - \Delta U_2,$$

где $x^* = \frac{1,5(2x_{\Phi} + x_1)}{x_1}$.

Режим IIб описывается системой уравнений в относительных единицах:

$$\frac{U_d}{\sqrt{2}U_{20}} - \frac{4,5x_{\Phi}}{x_1} \frac{R_d}{x_{\Phi}} \left[1 - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] -$$

$$- \frac{V\sqrt{3}R_d}{x_{\Phi}^2} \left[\sin \omega t_2 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{x_5 + 2x_\Phi}{x_4} \frac{R_d}{x_\Phi} \left[\sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6} \right) - \sin \alpha \right] = 0; \\
& \frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} - \frac{1,5x_\Phi R_d}{x_1 x_\Phi} \left[1 - \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] - \\
& \quad - \frac{\sqrt{3} R_d}{x_\Phi} \left[\sin \omega t_2 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] + \\
& \quad + \frac{x_5 R_d}{x_4 x_\Phi} \left[\sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6} \right) - \sin \alpha \right] - \\
& - \frac{3x_\Phi R_d}{x_1 x_\Phi} \left[\cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3} \right) - \cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3} \right) \right] = 0; \\
& \frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} = \frac{3}{2\pi} \left[x^* + (1 - x^*) \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{x_5}{x_4} - 1 \right) \sin \alpha \right] + \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x_5}{x_4} - 1 \right) \sin \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{6} \right) + \\
& \quad + \frac{3}{2\pi} (1 - x^*) \cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3} \right) + \\
& \quad + \frac{3}{2\pi} x^* \cos \left(\omega t_2 + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\Delta U_2}{\sqrt{2} U_{20}}.
\end{aligned}$$

Как и в режиме IIa,

$$\frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} = f \left(\frac{x_\Phi}{R_d}; \frac{x_{2s0}}{x_s}; \frac{\Delta U_2}{U_{20}}; \alpha \right).$$

Решить систему уравнений в общем виде невозможно. Необходимо использовать ЭЦВМ. В результате получаем семейство регулировочных характеристик в режиме IIб:

$$\frac{U_d}{\sqrt{2} U_{20}} = f(\alpha)$$

для различных значений x_Φ/R_d при нескольких значениях x_{2s0}/x_s и $\Delta U_2/U_{20}$.

Исходя из полученных соотношений для работы выпрямителя при различных углах регулирования, производим расчет сварочного трансформатора и импульса сварочного тока.

Номинальный коэффициент трансформации k_N определяем исходя из получения максимального тока при $\alpha=0$ для минимального линейного напряжения

$U_{л\ min}$ в диапазоне стабилизации (что соответствует режиму I): $k_N = U_{л\ min}/U_{20N}$. Из уравнения внешней характеристики в режиме I при $\alpha=0$

$$U_{dN} = 1,17U_{20N} - I_{d\ max}x_s - \Delta U_2$$

определяем

$$U_{20N} = \frac{I_{d\ max}(R_d + x_s) + \Delta U_2}{1,17}$$

и, следовательно, коэффициент трансформации k_N . Амплитуда вторичного фазного тока $I_{2\phi m} = I_{d\ max}$. Действующее значение вторичного фазного тока во время импульса тока, если принять ток прямоугольной формы длительностью за период $2\pi/3$, равно

$$I_{2\phi} = I_{d\ max}/\sqrt{3}.$$

Амплитуда первичного фазного тока (без учета намагничивающей составляющей)

$$I_{1\phi m} = I_{d\ max}/k_N.$$

Действующее значение первичного фазного тока во время импульса тока

$$I_{1\phi} = \frac{I_{d\ max}}{k_N\sqrt{3}}.$$

Длительный вторичный фазный ток

$$I_{2\phi.дл} = I_{2\phi}\sqrt{ПВ},$$

где $ПВ = \frac{t_{вкл}}{t_{вкл} + t_{п}}$ — продолжительность включения вы-

прямителя (машины); $t_{вкл}$ — длительность включения выпрямителя (длительность импульса тока); $t_{п}$ — длительность паузы; причем $t_{вкл} + t_{п} = t_{ц}$ — длительность цикла сварки. Длительный первичный фазный ток

$$I_{1\phi.дл} = I_{2\phi.дл}/k_N.$$

Индукция в стержнях магнитопровода трансформатора принимается равной $B = 1,25 \div 1,4$ Т. Сечение

стержня магнитопровода

$$S = \frac{U_{л \min}}{4,44B\omega_{1N}f},$$

где ω_{1N} — число последовательно соединенных витков фазы первичной обмотки на номинальной ступени; f — частота линейного напряжения.

Таким образом, получены основные данные для расчета и конструирования сварочного трансформатора. Дальнейший расчет трансформатора проводится по известной методике [15].

При фазовом регулировании сварочного тока формируется импульс тока сложной формы. Практически это выполняется ступенчатым изменением угла α через заданные промежутки времени. В этих условиях импульс тока можно рассматривать как ток, получающийся под действием напряжения прямоугольной формы, изменяющегося ступенчато через заданные промежутки времени. Напряжение на каждом участке равно постоянной составляющей выпрямленного напряжения, соответствующей определенному значению α . При увеличении α (уменьшении U_d) режим I сменяется режимом II, а при дальнейшем увеличении α — режимом III. Для участков с $U_d < U_{d \max}$ необходимо определить, какому режиму соответствует данное U_d .

Граничное значение угла $\alpha_{\text{гр}}$ определяем по приведенному выше уравнению, используя известные для данной машины параметры и относительные падения напряжения на вентилях. По $\alpha_{\text{гр}}$ находим выпрямленное напряжение, соответствующее границе режимов II и III. Если заданные на участках значения U_d меньше граничного значения, то соответствующие им углы α определяем из уравнения для постоянной составляющей выпрямленного напряжения в режиме III, решая его относительно $\cos(\alpha + \pi/6)$. Если заданные на участках значения больше граничного значения, то им соответствует режим II, который в точке $\alpha = \alpha_k$ разделяется на режимы IIa и IIб. Определив α_k , находим U_d на границе режимов IIa и IIб. Углы α , соответствующие заданным значениям U_d , определяем решением системы уравнений для режимов IIa или IIб. Таким образом, определяем углы регулиро-

вания, обеспечивающие заданное установившееся значение сварочного тока на всех участках импульса сложной формы.

Изменение сварочного тока при переходе от одного установившегося значения к другому происходит по экспоненте. Постоянная времени экспоненциальной кривой

$$\tau = \frac{L_d}{R_d + x_3},$$

где L_d — индуктивность сварочного контура; R_d — сопротивление постоянному току сварочного контура, включая сопротивление свариваемых деталей; x_3 — эквивалентное внутреннее индуктивное сопротивление выпрямителя, приведенное к стороне постоянного тока, определяющее падение выпрямленного напряжения при нагрузке.

Как указано выше, для режима I $x_3 = \frac{3}{2\pi} x_\Phi$, для режима III $x_3 = x_1 / (3\pi)$. Рассчитать в явном виде x_3 для режима II не представляется возможным. Поэтому x_3 для режима II определяем из уравнения внешней характеристики, общего для всех режимов:

$$U_d = U_{d0\alpha} - I_d x_3 - \Delta U_2,$$

где $U_{d0\alpha}$ — постоянная составляющая выпрямленного напряжения холостого хода при заданном угле регулирования. Как указано выше,

$$U_{d0\alpha} = 1,17 U_{20} \cos \alpha$$

для режима I;

$$U_{d0\alpha} = \frac{1,17}{\sqrt{3}} U_{20} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right]$$

для режимов II и III.

Следовательно, для режима II

$$x_3 = \frac{U_{d0\alpha} - U_d - \Delta U_2}{I_d}.$$

Для определения постоянной времени используем значение x_3 , рассчитанное для участка импульса, следующего за данным переходным процессом. Ток

в процессе перехода от n -го участка импульса к $(n+1)$ -му участку

$$I_d = I_{d(n)} + (I_{d(n+1)} - I_{d(n)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{(n+1)}}}\right),$$

если $I_{d(n)} < I_{d(n+1)}$;

$$I_d = I_{d(n+1)} + (I_{d(n)} - I_{d(n+1)}) e^{-\frac{t}{\tau_{(n+1)}}},$$

если $I_{d(n)} > I_{d(n+1)}$.

Используя результаты анализа режимов выпрямления, можно объяснить характер процесса выключения выпрямителя. После снятия отпирающих импульсов с управляемых вентилей одновентильный интервал на вторичной и первичной стороне сменяется интервалом гашения — шунтирования тока, который сменяется интервалом шунтирования тока. При этом гаснет управляемый вентиль, выпрямитель отключается от сети, а выпрямленный ток постепенно затухает, распределяясь равномерно по трем фазам на вторичной стороне.

Глава вторая

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Общая компоновка машин

Компоновка машин постоянного тока отличается от традиционной компоновки, принятой для машин переменного тока промышленной частоты и трехфазных машин низкой частоты. Основной принцип традиционной компоновки — обеспечение минимального пути тока от вторичной обмотки сварочного трансформатора до электродов машины с целью уменьшения потребляемой мощности. При этом соображения оптимизации конструкции механической части, воспринимающей усилие привода сжатия электродов и обеспечивающей необходимую жесткость машины, от-

ходят на второй план. В наиболее нагруженной части стойки корпуса машины, к которой крепятся верхний и нижний кронштейны, предусматривается окно для прохода токопроводов вторичного контура, что снижает жесткость корпуса.

Малая зависимость потребляемой мощности машин постоянного тока от размеров вторичного контура на стороне выпрямленного тока позволила принять компоновку, оптимальную для конструкции механической части [1]. Силовой корпус машин (рис. 19),

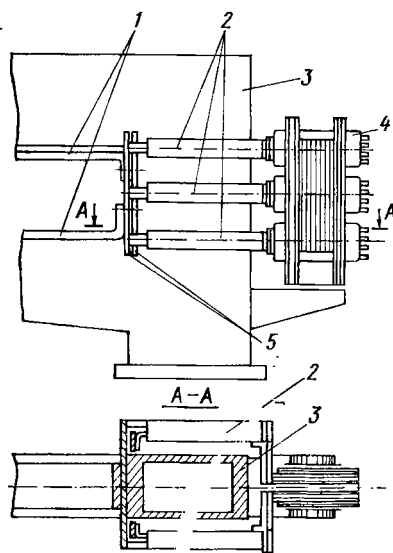


Рис. 19

включающий в себя вертикальную стойку, верхний и нижний кронштейны, выполнен в виде узкой скобы коробчатого сечения 3 без каких-либо вырезов. Это позволяет без дополнительных затрат металла существенно повысить жесткость машины. Позади вертикальной стойки скобы расположен сварочный трансформатор 4, а по обе стороны ее — блоки вентилялей 2. В машинах на небольшие токи блоки вентилялей находятся с одной стороны

стойки.

На уровне передней стенки стойки расположены вертикальные сборные шины 5 выпрямителя, к которым подключаются блоки вентилялей. К сборным шинам присоединены токоподводы 1 сварочного контура, закрепленные на верхнем и нижнем кронштейнах. Эта компоновка несколько изменена в машинах, одним из основных требований к которым является минимальная занимаемая площадь. В них сохраняется узкая скоба коробчатого сечения. Сварочный трансформатор располагается не позади

вертикальной стойки, а над ней и верхним кронштейном, по обе стороны которых находятся блоки вентиляей. При этом возрастает общая высота машины, но сокращается занимаемая площадь.

Элементы электрической силовой части, расположенные снаружи корпуса машины, защищены кожухом с открывающимися дверями. Благодаря этому к ним обеспечен легкий и удобный доступ для осмотра и ремонта.

В сварочном трансформаторе диски вторичной обмотки делятся на две изолированные группы, каждая из которых питает блоки вентиляей, расположенные с соответствующей стороны корпуса. Благодаря этому улучшается распределение тока между параллельно работающими блоками вентиляей, подключенными к одной фазе вторичной обмотки трансформатора. Кроме того, наличие независимых параллельных ветвей уменьшает индуктивность фазы выпрямителя, что снижает потери на коммутацию фазных токов. В остальном компоновка машин постоянного тока не отличается от компоновки машин других типов аналогичного назначения.

2. Конструкция блока силовых вентиляей

Основным узлом блока силовых вентиляей является групповой охладитель, представляющий собой интенсивно охлаждаемую водой медную шину значительной толщины, на которой установлены включенные параллельно полупроводниковые вентили. В машинах, разработанных до 1973 г., используются кремниевые вентили типа ВВ2-500 на средний ток 500 А, с резьбовым кольцом, устанавливаемое по 16 штук в групповой охладитель блока (рис. 20,а). Резьбовое кольцо 2 впаивается в расточку, выполненную в групповом охладителе 1. Вентиль 5 вворачивается в кольцо резьбовой частью корпуса, который является катодным выводом. Анодный вывод вентиля в виде гибкой косы подключается к анодной шине 4 блока. В групповом охладителе по системе внутренних каналов вода подводится непосредственно к нижнему торцу корпуса каждого вентиля, что обеспечивает эффективное охлаждение. Круглая резиновая манже-

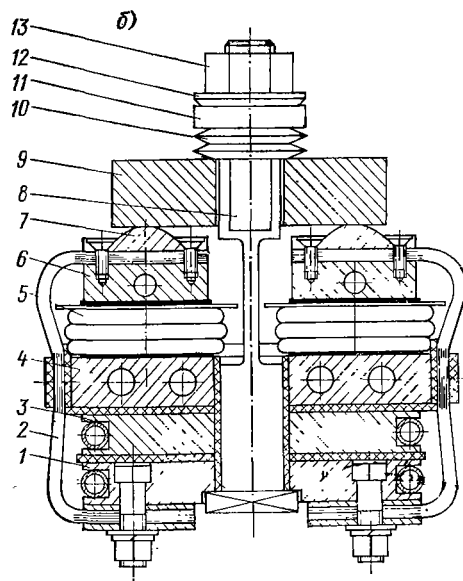
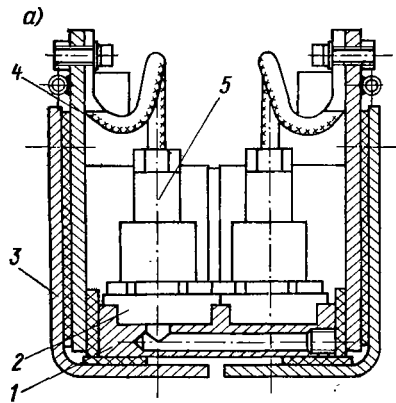


Рис. 20

та, сжимаемая торцом корпуса вентиля при вворачивании в резьбовое кольцо, уплотняет камеру охлаждения.

Групповой охладитель подключается к выводу вторичной обмотки трансформатора. Анодная шина блока подключается к отрицательной сборной шине выпрямителя. Кроме токоведущих шин, непосредственно соединенных с катодом и анодом вентилях (прямых шин), в состав блока входит дополнительная нулевая (обратная) шина 3, которая подключается одним концом к выводу вторичной обмотки трансформатора, а другим — к положительной сборной шине выпрямителя, являющейся нулевой точкой схемы. Нулевая шина расположена в непосредственной близости от двух прямых шин блока, отделена от них тонкими изоляционными прокладками и геометрически подобна им [7]. Благодаря такой конструкции достигается минимальная индуктивность цепи блока вентилях и отдельных участков, что снижает потери на коммутацию и улучшает распределение тока между параллельно включенными вентилями. Вентили, устанавливаемые в каждый блок, подбираются по прямому падению напряжения.

В машинах более поздней разработки (1973—1974 гг.) применяются вентили таблеточной конструкции типа ВВ-1250 на средний ток 1250 А. Они также устанавливаются в блоке (рис. 20,б) на групповой охладитель 4 в виде медной шины. Вентили прижимаются попарно к групповому охладителю и индивидуальным катодным охладителям 6 с помощью болта 8, гайки 13, комплекта тарельчатых пружин 10 и коромысла 9. Усилие зажатия для равномерного распределения его между двумя вентилями 5 передается от гайки на тарельчатые пружины и коромысло через шайбы 11, 12 с шаровыми поверхностями, позволяющими коромыслу самоустанавливаться, опираясь на шаровые накладки 7 индивидуальных катодных охладителей. Значительная деформация комплекта тарельчатых пружин стабилизирует усилие сжатия вентилях, делая его независимым от возможных небольших деформаций элементов, входящих в сжатый пакет. С целью снижения требований к чистоте обработки поверхности группового и индивидуальных охладителей

дителей по обе стороны вентиля устанавливаются прокладки из оловянной фольги. Кроме основной шины — группового охладителя, в состав блока входят еще две токоведущие охлаждаемые водой медные шины, изолированные друг от друга прокладками. К одной из них — катодной, являющейся прямым тоководом 1, подключаются проводящие ток вентилей гибкие шины 2, приваренные диффузионной сваркой к индивидуальным катодным охладителям. Средняя шина 3 блока является обратной нулевой шиной. Она геометрически подобна прямым шинам, расположена между ними и подключается одним концом к выводу вторичной обмотки трансформатора, а другим — к положительной сборной шине, являющейся нулевой точкой схемы выпрямителя. Групповой охладитель подключается к отрицательной сборной шине, а катодная шина блока — к другому выводу вторичной обмотки трансформатора.

Разработаны три типоразмера блоков вентиляей, параметры которых приведены в табл. 2. Включение

Таблица 2

Параметр	Нормы для типов исполнений		
	БВ-01	БВ-02	БВ-03
Количество вентиляей, шт.	4	6	8
Максимальный ток трехфазного нулевого выпрямителя, имеющего в каждой фазе по одному блоку вентиляей, кА:			
при ПВ* = 100%	10	16	20
при ПВ* = 32% и длительности импульса не более 0,3 с	16	25	32
Расход охлаждающей воды, л/мин, не менее:			
через групповой охладитель	5	5	5
в остальных ветвях	2	2	2

* ПВ и длительность импульса даны для выпрямителя.

в каждую фазу выпрямителя машины по два или четыре блока параллельно обеспечивает номинальные сварочные токи 40, 63 и 80 кА при различных ПВ. В машинах с номинальным током 100 и 160 кА используются по два выпрямителя, работающих параллельно.

Таблеточные кремниевые вентили типа ВВ-1250 в соответствии с ГОСТ 10662—73 имеют амплитудное значение прямого падения напряжения не более 2 В. В связи с тем что этот тип вентиля предназначен для работы в цепях высокого напряжения, прямое падение напряжения оказывается близким к предельному значению. Учитывая, что выпрямленное напряжение в сварочном контуре при номинальном токе составляет 2—3 В, снижением прямого падения напряжения до практически реального значения 1—1,2 В можно существенно улучшить энергетические характеристики машин. Для цепей низкого напряжения разрабатываются специальные низковольтные кремниевые вентили с максимальным обратным напряжением не выше 100 В при амплитуде прямого падения напряжения порядка 1,2 В, которые будут применяться в контактных машинах.

Для обеспечения интенсивного отвода тепла, выделяющегося в вентилях, в групповом охладителе просверлены продольные и поперечные каналы, по которым циркулирует охлаждающая вода. Расход воды контролируется в машинах с помощью гидравлических реле. Такое охлаждение действует достаточно эффективно. Однако в местах перехода воды из продольных каналов в поперечные и обратно постепенно осаждаются растворенные в воде соли, сужая канал и ухудшая охлаждение. Для возможности механической прочистки каналов технологические отверстия в групповом охладителе, через которые производилось сверление каналов, закрыты резьбовыми вывинчивающимися пробками.

Остальные токоведущие шины блоков вентиля не требуют столь интенсивного охлаждения. Поэтому охлаждение их осуществляется с помощью медной трубки, припаянной по периметру шин. Трубка не имеет резких изгибов, благодаря чему засорение ее канала происходит значительно медленней и механической прочистки не требуется.

3. Циклограмма работы машин

В машинах постоянного тока обеспечивается регулирование сварочного тока по значению, форме и длительности в широких пределах, что позволяет со-

здать машины с большими технологическими возможностями по сварке изделий из металлов и сплавов широкой номенклатуры и с большим диапазоном толщин.

Для реализации технологической универсальности оборудования привод усилия сжатия электродов и схема управления обеспечивают работу машин по различным сложным и простым циклам и глубокое регулирование усилия сжатия. Для машин с усилием сжатия до 8000 даН применяется пневматический

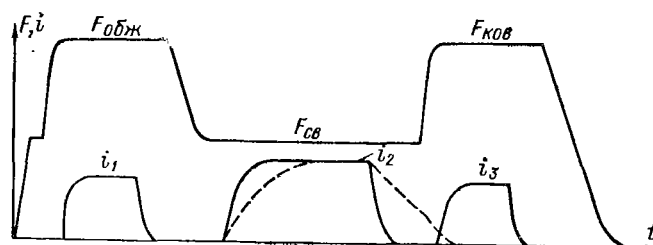


Рис. 21

привод, при более высоком усилии сжатия — гидравлический привод. Для получения глубокого регулирования усилия пневматический привод выполняется с суммированием на общем штоке усилий двух поршней пневматического цилиндра. Камеры давления одного поршня имеют различную рабочую площадь, что позволяет еще более расширить диапазон регулирования усилия при работе с противодавлением. Гидравлический привод имеет более широкий диапазон регулирования усилия сжатия в связи с возможностью глубокого регулирования давления масла. Привод давления выполняется однопоршневым с различной рабочей площадью камер давления, что также создает возможность работы в режиме противодавления и обеспечивает глубину регулирования усилия до 1 : 25.

Наиболее сложная циклограмма работы машины приведена на рис. 21. В состав цикла входят три импульса тока i , осуществляющие предварительный подогрев деталей, сварку и отжиг после сварки. Зна-

Таблица 3

Тип машины	Номинальный сварочный ток, кА	Потребляемая мощность, кВт·А	Номинальное усилие сжатия электродов, даН	Вылет электродов, мм	Раствор сварочного контура, мм	Толщина свариваемых деталей, мм			Примечание
						Алюминиевые сплавы	Нержавеющие жаропрочные стали и сплавы титана	Малоуглеродистая сталь	
Для точечной сварки:									
МТВР-4001	40	330	1600/1200	800/1200	140/390	От 0,3+0,3 до 1,5+1,5	От 0,4+0,4 до 2,0+2,0	От 0,4+0,4 до 3,0+3,0	Радиальная с переменным вылетом и раствором
МТВ-6302	63	550	10 000	1200	600	—	От 3,0+3,0 до 8+8	От 4,0+4,0 до 12,0+12,0	С двумя подвижными электродами
МТВ-6304	63	500	4000	1500	500	От 0,5+0,5 до 3,0+3,0	От 0,5+0,5 до 3,0+3,0	От 0,5+0,5 до 6,0+6,0	
МТВ-8002	80	600	6300	1500	600	От 1,0+1,0 до 4,5+4,5	От 0,8+0,8 до 5,0+5,0	От 1,0+1,0 до 8,0+8,0	
МТВ-16002	160	1200	20 000	1700	600	От 2,5+2,5 до 8,0+8,0	От 2,5+2,0 до 10,0+10,0	От 4,0+4,0 до 20,0+20,0	
Для шовной сварки:									
МШВ-1602	16	120	2000	1500	500	—	От 0,3+0,3 до 3,0+3,0	От 0,3+0,3 до 1,5+1,5	
МШВ-6301	63	470	2000	1200	300	От 0,5+0,5 до 3,0+3,0	От 0,3+0,3 до 3,0+3,0	От 0,3+0,3 до 3,0+3,0	

Тип машины	Номинальный сварочный ток, кА	Потребляемая мощность, кВт·А	Номинальное усилие сжатия электродов, даН	Вылет электродов, мм	Раствор сварочного контура, мм	Толщина свариваемых деталей, мм			Примечание
						Алюминиевые сплавы	Нержавеющие жаропрочные стали и сплавы титана	Малоуглеродистая сталь	
МШВ-6302	63	470	1600	2100	500	От 0,5+0,5 до 2,0+2,0	—	—	Для соединения концов рулонов алюминиевой ленты
МШВ-10301	100	830	4000	1300	300	От 1,8+1,8 до 4,5+4,5	От 1,0+1,0 до 4,5+4,5	От 1,0+1,0 до 5,0+5,0	
МШВ-4001	40	300	2000	600	140	1,5+1,5	От 0,5+0,5 до 2,5+2,5	От 1,0+1,0 до 2,5+2,5	Для сварки по отбортовке с высокой скоростью
Для рельефной сварки: МРВ-6301	63	530	5000	1000	400	—	Кольцевой диаметр до 40 мм	—	
МРВ-4001	40	300	800	300	350	—	—	10 рельефов при 1,0+1,0	Для сварки сепараторов шарикоподшипников
МРВ-8001	80	700	3000	300	500	—	—	10 рельефов при 2,0+2,0	То же

чение тока, длительность импульсов и паузы между ними регулируются независимо друг от друга. Уменьшая до нуля паузу между вторым (основным) i_2 и третьим (дополнительным) i_3 импульсами и изменяя значение установившегося тока i_3 , можно получать замедленный спад сварочного тока с необходимой скоростью охлаждения сварного соединения. Усилие сжатия F изменяется в течение цикла сварки по заданной программе. Вначале задается повышенное усилие предварительного обжатия деталей $F_{обж}$, которое необходимо для ликвидации возможных зазоров между деталями и формирования стабильного контакта в случае сварки жестких конструкций. Затем усилие обжатия снижается до значения сварочного усилия $F_{св}$. С момента установления $F_{св}$ можно включать основной импульс тока, осуществляющий непосредственно сварку. После выключения сварочного тока усилие сжатия повышается с большой скоростью до значения ковочного усилия $F_{ков}$ для ликвидации усадочных дефектов при охлаждении сварного соединения.

В машинах для шовной сварки обеспечиваются глубокое регулирование скорости сварки при непрерывном вращении роликов и шаговое перемещение свариваемых деталей.

Основные технические данные отечественных машин постоянного тока для точечной, шовной и рельефной сварки приведены в табл. 3. Часть указанных машин выпускается промышленностью, а часть разработана; изготовлены опытно-промышленные образцы, которые находятся в эксплуатации.

Глава третья

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАШИН

1. Структурная схема станции управления

Схема управления машин постоянного тока обеспечивает простые и сложные циклы сварки с несколькими импульсами сварочного тока и переменным усилием электродов. Практически может быть задан лю-

бой цикл, необходимый при контактной сварке. Сварочный ток регулируется в отношении 1 : 3, его установленное значение стабилизируется при колебаниях напряжения питающей сети. Регулируется скорость нарастания тока. Включение двух или трех импульсов тока разной величины без пауз позволяет получить импульс тока сложной формы. Предусмотрена действующая электронная защита вентилей от недопустимой перегрузки по току. Отсчет времени всех операций цикла сварки производится дискретно в периодах напряжения питающей сети.

Структурная схема станции управления машины постоянного тока приведена на рис. 22. Характерная особенность схемы заключается в том, что счетчик 1—7 задает полное время цикла сварки, а не последовательно времена отдельных операций и сбрасывается в исходное положение один раз по окончании цикла. Работа счетчика не зависит от сложности и последовательности операций выбранного цикла сварки. Рабочие элементы машины (силовые электрические вентили, электропневматические клапаны, электрогидравлические золотники, электромагнитная муфта) управляются триггерами, подключаемыми к счетчику независимо друг от друга с помощью переключателей. Положение переключателей определяет моменты переключения триггеров, т. е. включение и выключение рабочих элементов машины. Установка переключателя какого-либо триггера в положение «выключено» исключает из цикла сварки работу управляемого им исполнительного элемента, т. е. соответствующую операцию. Если какой-либо исполнительный элемент машины должен включаться несколько раз за цикл сварки, то к нему подключаются выходы нескольких триггеров.

Таким образом, состав наиболее сложного цикла сварки определяется количеством независимых триггеров, имеющих в станции управления, а максимальное число операций может быть вдвое больше числа триггеров. Благодаря такому построению схемы при выборе режима сварки возможна установка любой последовательности подачи команд на рабочие элементы машины, что обеспечивает выбор оптимальных циклов сварки для всей номенклатуры сва-

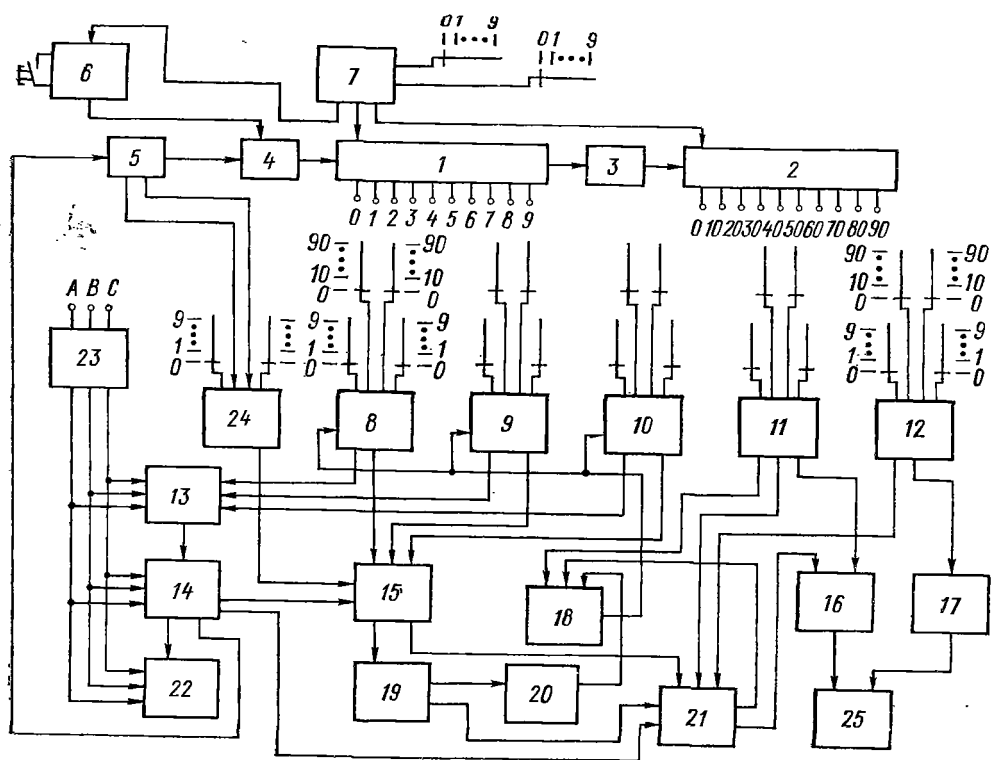


Рис. 22

риваемых металлов и сплавов. Кроме того, в некоторых случаях возможно устранение влияния инерционности исполнительных элементов путем подачи команды на включение или выключение их заблаговременно. Отсутствие многократного сброса счетчика импульсов в течение цикла сварки повышает надежность работы схемы по сравнению со схемами регуляторов цикла с последовательным отсчетом времени операций.

В схеме на рис. 22 три триггера 8, 9 и 10 включают три импульса тока, каждый из которых имеет независимую регулировку по амплитуде и длительности. При включении триггеры воздействуют на ключевой усилитель 15, подающий отпирающие импульсы от блока формирования на силовые управляемые вентили. Одновременно триггеры подают сигнал на соответствующий вход блока 13 регулирования фазы отпирающих импульсов, который, в свою очередь, подают сигнал на вход формирователя импульсов 14. Триггеры 11 и 12 управляют клапанами привода сжатия электродов 25 через выходные усилители 16, 17. Для предотвращения подъема электрода во время прохождения тока введена блокировка, выключающая с помощью усилителя 18 все триггеры тока одновременно с подачей триггером 11 команды на подъем электрода.

В блок силовых управляемых вентилях 19 входят трансформаторы тока, включенные в линейные провода питающей сети. Сигнал с этих трансформаторов поступает на блок защиты 20, который через усилитель 18 выключает все триггеры тока в случае, если линейный ток превысит заданное значение. Кроме того, в блоке силовых управляемых вентилях имеются трансформаторы с ферритовыми магнитопроводами, в которых возникают импульсы напряжения при включении каждого управляемого вентиля. Импульсы поступают в блок контроля 21, который выключает триггеры тока в случае, если количество импульсов превышает установленное значение, и запрещает дальнейшую работу машины, если количество импульсов отличается от заданного. В схеме предусмотрена модель 22 силового выпрямителя. На управляемые вентили схемы модели нагружены на стре-

лочный прибор, подаются импульсы напряжения с формирователя 14. По показаниям стрелочного прибора можно судить о значении напряжения силового выпрямителя машины, что облегчает настройку режима сварки и позволяет в производственных условиях проверить работу автоматической стабилизации с помощью блока имитации 23 изменения напряжения питающей сети.

Рассмотренная структурная схема положена в основу станций управления всех выпущенных нашей промышленностью контактных машин постоянного тока. В настоящее время выпускаются машины с тремя типами станций управления. Более простая станция управления типа СУВ-3×140 [6] к машине МШВ-6301 не содержит блока контроля, а триггер 11 выполняет в ней две функции в зависимости от режима работы машины. При работе машины в режиме шовной сварки триггер 11 управляет электромагнитной муфтой привода шагового вращения роликов и задает размер «шага», а усилитель 16, управляющий клапаном подъема электрода, подключается к блокировочному триггеру 6, так как подъем и опускание электрода производятся один раз в начале и по окончании шва.

Более сложные станции управления СУ-7 к машине МТВ-8001 и СУ-5 к машине МТВ-16001, кроме блока контроля, содержат еще дополнительный триггер пульсаций 24, позволяющий разделить каждый импульс сварочного тока на ряд отдельных импульсов. Сигнал от основных триггеров тока 8, 9 и 10 подается на ключевой усилитель 15 при участии триггера 24, который делит общее заданное время включения тока на более малые времена импульсов и пауз. Станция СУ-5 содержит два блока формирования импульсов 14 для управления шестью управляемыми вентилями машины.

2. Управление сварочным током

Управление сварочным током осуществляется с помощью трех силовых управляемых вентиляй, включенных последовательно с первичными обмотками трехфазного сварочного трансформатора. Для вклю-

чения этих вентилях необходимо подавать на них соответственно три импульса напряжения, сдвинутых относительно друг друга на 120° . Для обеспечения регулирования и стабилизации сварочного тока фаза импульсов должна изменяться на 90° переключателями настройки режима сварки. При изменении напряжения питающей сети на $\pm 10\%$ от номинального фаза импульсов должна автоматически изменяться на такой угол, чтобы заданное значение сварочного тока сохранялось неизменным с точностью $\pm 2,5\%$. В случае применения в качестве силовых управляемых вентилях тиристоров, необходимо, чтобы фронт отпирающих импульсов был достаточно крутым.

В схему управления сварочным током входят блоки 13, 14, 15, 19, 22, 23 по структурной схеме рис. 22. Принципиальная схема блока формирования импульсов приведена на рис. 23. Три одинаковых формирователя импульсов $\Phi 1$, $\Phi 2$ и $\Phi 3$ формируют импульсы напряжения в обмотках выходных импульсных трансформаторов $ТрИ1$, $ТрИ2$ и $ТрИ3$. Фаза каждого импульса определяется фазой входного переменного напряжения, подаваемого с обмотки вспомогательного трансформатора на базу транзистора $T3$ (точки 1 и 4) формирователя, и значением входного постоянного напряжения, общего для всех формирователей, подаваемого к точкам 7 и 4. Переменные напряжения находятся в фазе с тремя линейными напряжениями сети. Транзистор $T3$ открыт в течение половины периода при одной полярности переменного напряжения на базе и закрыт вторую половину периода при обратной полярности напряжения. Конденсаторы $C4$, $C5$ и $C6$, подключенные к точкам 5 и 4 формирователей, зашунтированы открытыми транзисторами одну половину периода и заряжаются от источника постоянного питающего напряжения через переменные резисторы $R1$, $R2$, $R3$ и коллекторные постоянные резисторы транзистора $T3$. Постоянные времена заряда с помощью переменных резисторов устанавливаются одинаковыми так, чтобы за половину периода переменного напряжения конденсаторы успевали зарядиться приблизительно до $1/4$ напряжения питания. Затем при открывании соответствующего транзистора конденсатор быстро разряжается. В результате

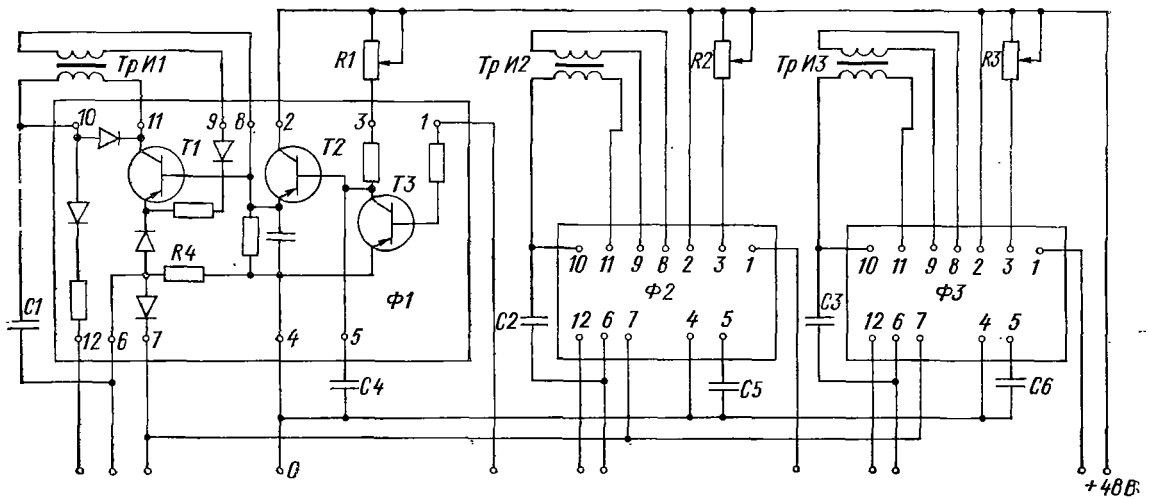


Рис. 23

напряжения на конденсаторах $C4$, $C5$ и $C6$ имеют пилообразную форму с амплитудой 10—12 В (рис. 24).

Пилообразное напряжение повторяется на эмиттерном резисторе транзистора $T2$ и подается на базу транзистора $T1$ через резистор $R4$, включенный между точками 6 и 4. К этому резистору через разделительный диод, подключенный к точкам 6 и 7, прикла-

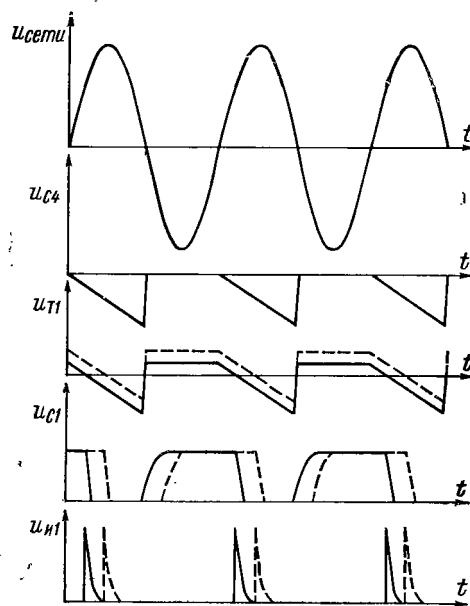


Рис. 24

дывается постоянное входное напряжение. Напряжение u_{T1} между базой и эмиттером транзистора $T1$ представляет собой разность постоянного напряжения, запирающего транзистор, и напряжения пилообразной формы. В момент их равенства транзистор $T1$ открывается, и в обмотке трансформатора $TrI1$ появляется импульс напряжения $u_{н1}$. (Аналогично с соответствующим сдвигом по фазе формируются импульсы напряжения в обмотках трансформаторов $TrI2$ и $TrI3$.) Для увеличения крутизны фронта импульса напряжения одна из обмоток каждого

трансформатора подключена к базовой цепи транзистора и осуществляет положительную обратную связь. Коллекторная цепь транзистора $T1$ питается от соответствующего конденсатора $C1$, $C2$ или $C3$, заряжаемого в нерабочие полупериоды от обмотки соответствующего вспомогательного трансформатора через диод и резистор, подключенные к точкам 10 и 12 формирователя. Значение и длительность импульсов напряжения, возникающих в обмотках трансформаторов, определяются энергией, запасенной в конденсаторах. После разряда конденсатора (u_{c1} на диаграмме рис. 24) ток в транзисторе прекращается. Меняя значение постоянного напряжения, подводимого к точкам 7 и 4 , можно изменять момент отпираания транзистора $T1$, т. е. фазу импульсов в обмотках трансформаторов.

С выходных обмоток трансформаторов $ТрИ1—ТрИ3$ сформированные импульсы подаются на базы трех транзисторов $T4—T6$ ключевого усилителя (рис. 25). В коллекторные цепи транзисторов включены первичные обмотки выходных трансформаторов $ТрИ4—ТрИ6$, со вторичных обмоток которых импульсы подаются при открывании ключевого усилителя на управляющие электроды силовых управляемых вентилях. Транзисторы усилителя получают питание через управляемый вентиль $УВ$, управляющий электрод которого при отсутствии входного сигнала на усилителе зашунтирован транзистором $T9$. Транзистор $T9$ открыт положительным напряжением, поданным на его базу от источника питания (точка 3) через резистор $R5$ и диод $Д1$. При одновременной подаче положительных сигналов на базы входных транзисторов $T7$ и $T8$ (точки 4 и 7) последние открываются и снимают положительное напряжение с базы транзистора $T9$, который закрывается отрицательным напряжением смещения, подаваемым на его базу от точки 5 через резистор $R6$. При этом появляется положительное напряжение на управляющем электроде управляемого вентиля $УВ$, через который питаются транзисторы $T4—T6$ с выходными трансформаторами. Положительный сигнал на первый вход усилителя поступает с одного из триггеров тока, а на второй вход — с триггера пульсаций. В случае работы без

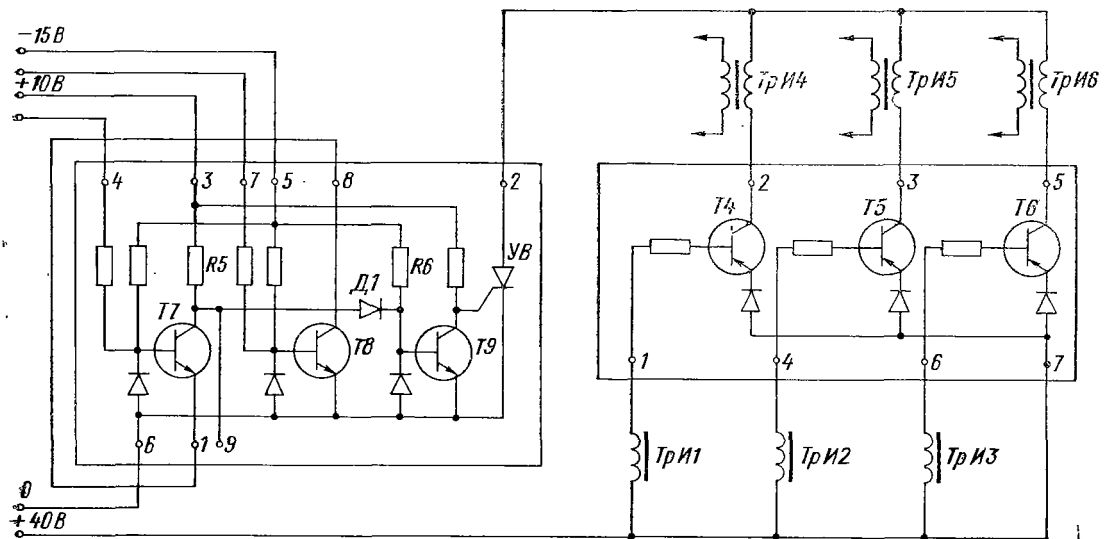


Рис. 25

пульсаций сигнал на второй вход усилителя подается постоянно.

Триггеры тока одновременно с сигналом на ключевой усилитель подают сигнал на соответствующие входы блока регулирования фазы отпирающих импульсов (рис. 26), от которого установленное постоянное напряжение поступает на формирователи импульсов. Значение этого напряжения, соответствующее основному импульсу сварочного тока, задается двойным переключателем $B1$, подключенным к двум наборам резисторов $R4—R14$ и $R16—R25$, на которые подано выпрямленное напряжение, пропорциональное напряжению питающей сети. Напряжение на одном наборе резисторов $R16—R25$ стабилизировано с помощью стабилитрона $D1$. Поэтому все приращения напряжения за счет колебаний напряжения сети выделяются на другом наборе резисторов $R4—R14$.

На вход формирователя импульсов подается напряжение с движков переключателя $B1$, т. е. падение напряжения на части наборов резисторов, включенной между движками. Первое положение переключателя соответствует минимальному сварочному току, т. е. максимальному напряжению между движками. Одиннадцатое положение переключателя соответствует максимальному сварочному току, т. е. минимальному напряжению между движками. Необходимое значение напряжения в обоих случаях устанавливается при настройке станции с помощью переменных резисторов $R15$ и $R26$. С помощью переменного резистора $R3$ устанавливается интенсивность изменения снимаемого напряжения при колебаниях напряжения питающей сети, т. е. интенсивность работы автоматической стабилизации.

При установке максимального сварочного тока и понижении напряжения сети от номинального, что соответствует работе силового выпрямителя при малых углах регулирования, интенсивность работы автоматической стабилизации в связи с косинусоидальной зависимостью выпрямленного напряжения от угла регулирования должна быть больше, чем во всех остальных случаях. Это достигается включением последовательно с набором резисторов $R4—R14$ дополнительного резистора $R2$ и транзистора $T1$. Движок

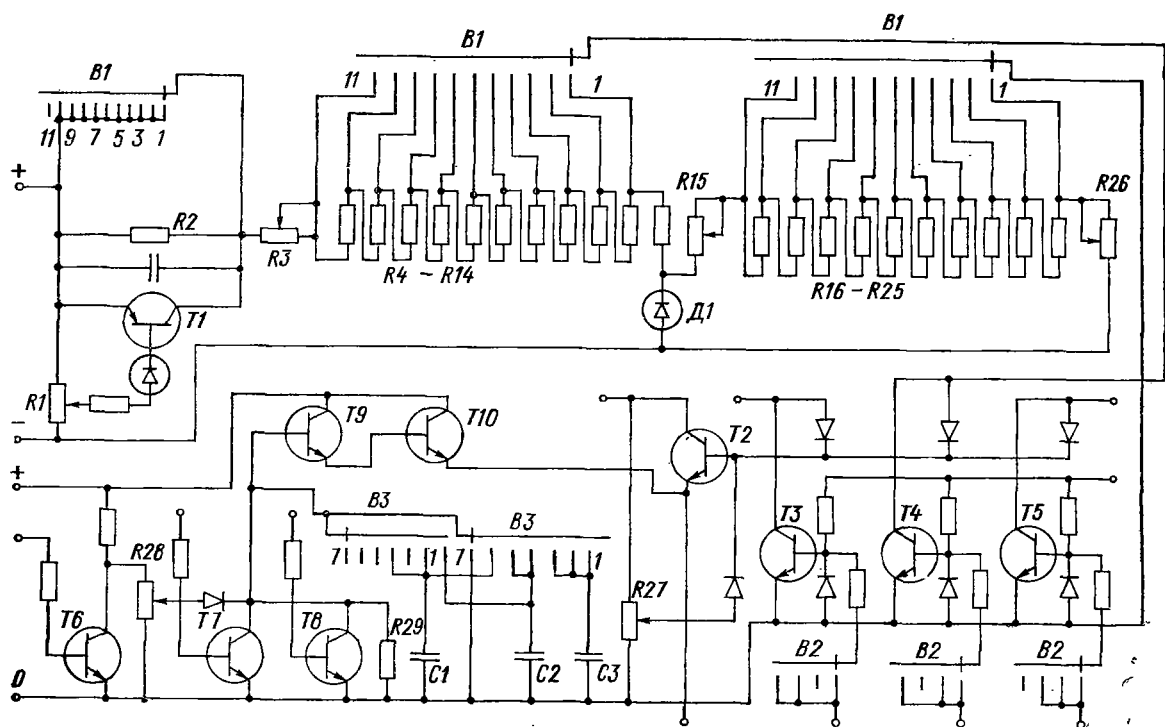


Рис. 26

переменного резистора $R1$ устанавливается при настройке станции в такое положение, что изменение питающего напряжения от минимального до номинального значения переводит транзистор $T1$ из закрытого в полностью открытое состояние. Транзистор шунтирует резистор $R2$, форсируя изменение напряжения на наборе резисторов $R4—R14$. В остальных положениях, кроме одиннадцатого, переключатель $B1$ шунтирует форсирующую цепочку движком дополнительной платы.

Напряжение, соответствующее двум дополнительным импульсам сварочного тока, задается двумя другими переключателями с помощью наборов резисторов, собранных по более простой схеме. Выбор одного из трех заданных напряжений и подача его в блок формирования импульсов осуществляются с помощью четырех транзисторов $T2—T5$, три из которых связаны с тремя триггерами тока, а четвертый $T2$ является выходным. На базу транзистора $T2$ поданы через разделительные диоды напряжения с трех переключателей, задающих токи основного и двух дополнительных сварочных импульсов. Однако до включения сварочного тока эти напряжения зашунтированы транзисторами $T3—T5$, которые открыты сигналами с трех триггеров тока, поступающими через переключатель $B2$. Поэтому выходное напряжение, подаваемое транзистором $T2$ на формирователи импульсов, определяется положением движка переменного резистора $R27$ и соответствует минимальному сигналу, т. е. полнофазной работе силовых управляемых вентилях. При включении какого-либо триггера тока снимается отпирающий сигнал с соответствующего транзистора и на базу транзистора $T2$, а следовательно, и на вход блока формирователей подается напряжение, соответствующее заданному значению сварочного тока. При установке режима сварки имеется возможность снять сигнал с любого транзистора $T3—T5$ с помощью переключателя $B2$ и проверить заданное значение тока по модели силового выпрямителя.

В блоке регулирования фазы управляющих импульсов имеется узел, позволяющий регулировать скорость нарастания сварочного тока. В него входит составной транзистор $T9—T10$, на базу которого пере-

ключателем $B3$ подключается набор конденсаторов $C1—C3$ и подается напряжение с движка переменного резистора $R28$ через разделительный диод. В момент включения триггера основного тока сигнал с него подается на транзистор $T6$, который шунтирует резистор $R28$. С этого момента набор конденсаторов разряжается на резистор $R29$. Выходное напряжение составного транзистора, подаваемое на формирователь, плавно уменьшается до нуля, увеличивая сварочный ток до значения, заданного переключателем основного импульса тока. При включении триггеров дополнительных импульсов тока открывается транзистор $T7$ или $T8$ и шунтирует набор конденсаторов, снимая сигнал с составного транзистора. Благодаря этому замедления нарастания тока не происходит.

К схеме управления сварочным током относится и модель силового выпрямителя, состоящая из трехфазного понижающего трансформатора, маломощных диодов и тиристоров, соединенных по схеме, аналогичной схеме силового выпрямителя машины. На управляющие электроды тиристоров постоянно подаются те же управляющие импульсы от трансформаторов блока формирования, что и на силовые тиристоры при работе машины. По показаниям вольтметра, включенного на выходе выпрямителя модели, можно определить выпрямленное напряжение при изменении фазы управляющих импульсов и напряжения питающей сети, что в определенном масштабе отражает изменение силового выпрямленного напряжения, которое будет приложено к сварочному контуру машины во время сварки. Вольтметром модели можно пользоваться при установке режима сварки и для контроля работы и настройки автоматической стабилизации.

Первичные обмотки трансформатора модели, блок формирования и блок регулирования фазы управляющих импульсов питаются от трех трансформаторов блока имитации изменения напряжения сети, подключенных к трем фазам питающей сети через переключатель. Первичные обмотки трансформаторов имеют ряд отпаяек, к любой из которых может быть подключено питающее напряжение. Одна из отпаяек принята за номинальную. К номинальным отпайкам подклю-

чается вольтметр контроля напряжения сети. При работе машины движки переключателя также подключены к номинальным отпайкам трансформаторов. При проверке работы автоматической стабилизации с помощью переключателя поочередно устанавливается число витков первичных обмоток трансформаторов больше и меньше номинального, что эквивалентно изменению напряжения питающей сети. Изменение напряжения проверяется по контрольному сетевому вольтметру, а выпрямленное напряжение — по вольтметру модели.

3. Управление циклом сварки

Управление циклом сварки осуществляется регулятором цикла сварки, в состав которого входят блоки 1—12, 16, 17 и 24 по структурной схеме рис. 22. Принцип построения регулятора описан в § 1 настоящей главы. В станциях управления, разработанных до 1973 г., блоки счетчика и триггеры выполнены на приборах тлеющего разряда — декатронах типа А-102 и безнакальных тиратронах типа МТХ-90. Конструкция и работа их достаточно подробно описаны в литературе [11, 12]. Выходные и промежуточные усилители содержат по два каскада транзисторов и тиристор типа КУ-201 на выходе. Два транзистора первого каскада усилителя могут переключаться, образуя схему И или схему ИЛИ. Работа аналогичного усилителя с входным каскадом, соединенным по схеме И, описана в предыдущем параграфе (рис. 25).

На рис. 27 приведена принципиальная схема счетчика, в которую входят блоки 1—5 и 7 по структурной схеме рис. 22. Один из трех декатронов используется в качестве множителя. На его вход (точка 13) непрерывно поступают отрицательные импульсы напряжения от формирователя импульсов (импульсы синхронизации). Каждый импульс переводит разряд в декатроне на следующий катод. К одному из катодов декатрона с помощью переключателя П1 подключается через разделительный конденсатор управляющий электрод тиратрона Л1. На управляющий электрод тиратрона через резистор сопротивлением 10 МОм подается постоянное стабилизированное напряжение,

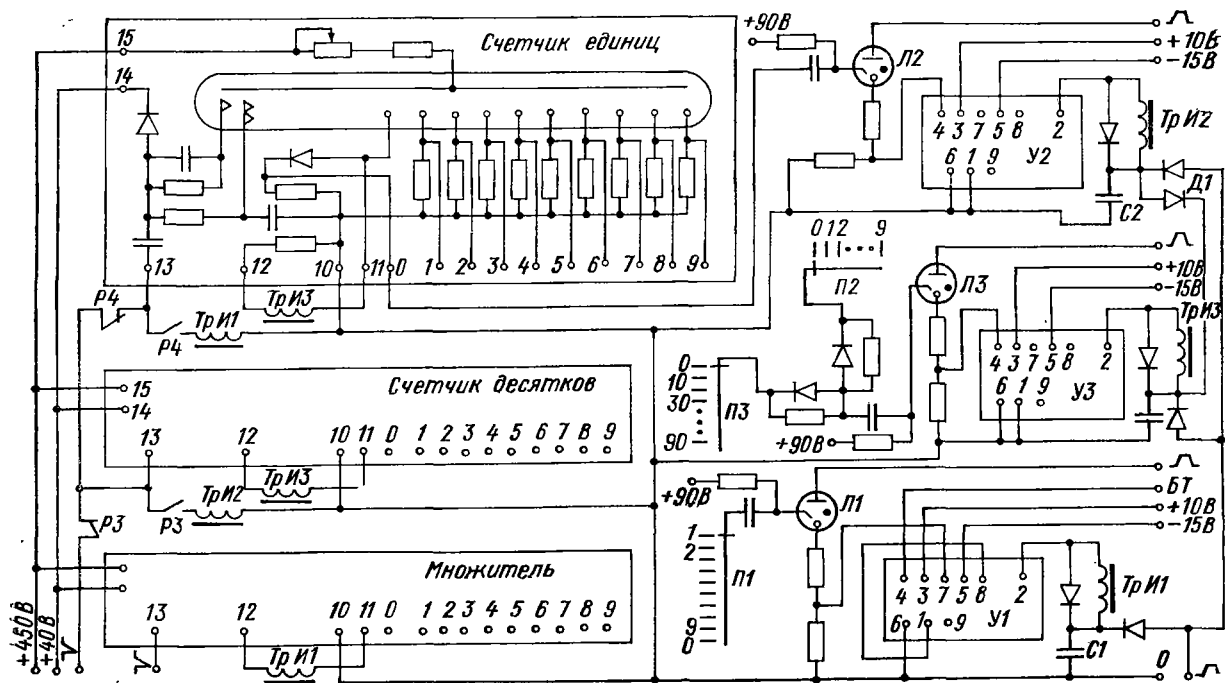


Рис. 27

которое (90—95 В) несколько больше напряжения пробоя промежутка управляющий электрод — катод. Однако последовательно включенный резистор ограничивает значение проходящего «тока подготовки», и основной разряд анод — катод не возникает, несмотря на наличие анодного напряжения. Ток подготовки стабилизирует работу тиратрона [11]. В момент прихода разряда в декатроне на катод, к которому подключен вход тиратрона, в цепи управляющего электрода возникает толчок тока, что вызывает возникновение основного разряда анод — катод. На катодном сопротивлении тиратрона появляется напряжение, поступающее на один из входов усилителя У1, входные транзисторы которого включены по схеме И. Если на второй вход усилителя тоже подан сигнал от блокировочного триггера, то усилитель включается, и в обмотках трансформатора *ТрИ1* возникает импульс напряжения. Питание на анод тиратрона *Л1* подается в виде полуволны напряжения, по окончании которой тиратрон гаснет. Аналогично осуществляется питание выходного тиристора усилителя У1, который питается от накопительного конденсатора *С1*, заряжаемого полуволной напряжения в нерабочий полупериод (по отношению к импульсу синхронизации). Благодаря этому тиратрон и выходной тиристор включаются на время менее 0,01 с.

Одна из вторичных обмоток трансформатора *ТрИ1* включена в цепь нулевого катода декатрона-множителя. Поэтому возникающий в обмотке импульс напряжения возвращает разряд в декатроне на нулевой катод. Другая обмотка трансформатора *ТрИ1* подключена через контакт циклового реле *Р4* на вход декатрона — счетчика единиц. Каждый возврат декатрона-множителя в нулевое положение при включенном цикловом реле перемещает разряд в счетчике единиц на следующий катод. (Тиратрон *Л1* и усилитель У1 составляют блок 4 по структурной схеме рис. 22.) Аналогично приход разряда на нулевой катод после отсчета десяти импульсов в декатроне — счетчике единиц — перемещает на следующий катод разряд в декатроне — счетчике десятков. Для этого к нулевому катоду декатрона — счетчика единиц — подключена входная цепь тиратрона *Л2*, сигнал с кото-

Рого поступает на вход усилителя $У2$ с выходным трансформатором $ТрИ2$. Входные транзисторы усилителя включены по схеме ИЛИ. Питание анодных цепей тиратрона $Л2$ и тиристора усилителя $У2$ осуществляется также полуволной напряжения. Тиратрон $Л2$ и усилитель $У2$ составляют блок 3 по структурной схеме рис. 22.

К катодам декатронов — счетчиков единиц и десятков — с помощью переключателей $П2$ и $П3$ и диодов, образующих схему И, подключена входная цепь тиратрона $Л3$. Положительное напряжение (20 В) появляется на входе тиратрона $Л3$ в момент одновременного наличия разрядов на тех катодах декатронов, к которым подключены движки переключателей $П2$ и $П3$, т. е. когда декатроны отсчитают установленное этими переключателями число импульсов, поступающих от декатрона-множителя. В этот момент включается тиратрон $Л3$ и подает сигнал на вход усилителя $У3$, входные транзисторы которого соединены по схеме ИЛИ. В обмотках выходного трансформатора $ТрИ3$ появляется импульс напряжения, который переводит на нулевые катоды разряды в декатронах-счетчиках, заканчивая цикл счета. Одновременно усилитель $У3$ разряжает через разделительный диод $Д1$ накопительный конденсатор $С2$ усилителя $У2$, благодаря чему приход на нулевой катод разряда в декатроне — счетчике единиц — не вызывает «шага» декатрона — счетчика десятков. Переключатели $П2$, $П3$, тиратрон $Л3$ и усилитель $У3$ составляют блок 7 по структурной схеме рис. 22.

Возвращая в нулевое положение декатроны-счетчики, сигнал с обмотки трансформатора $ТрИ3$ поступает одновременно на вход тиратрона $Л4$, входящего в блокировочный триггер — рис. 28,а (блок 6 по структурной схеме рис. 22). Тиратрон $Л4$ включается и переводит блокировочный триггер в исходное положение, в результате чего снимается сигнал со второго входа (точка 4) усилителя $У1$ (см. рис. 27), что прекращает работу счетчика. С этого момента разряд одновременно во всех декатронах-счетчиках начинает перемещаться по кругу, так как на вход декатрона-множителя постоянно поданы импульсы синхронизации, а на входы декатронов — счетчиков единиц и де-

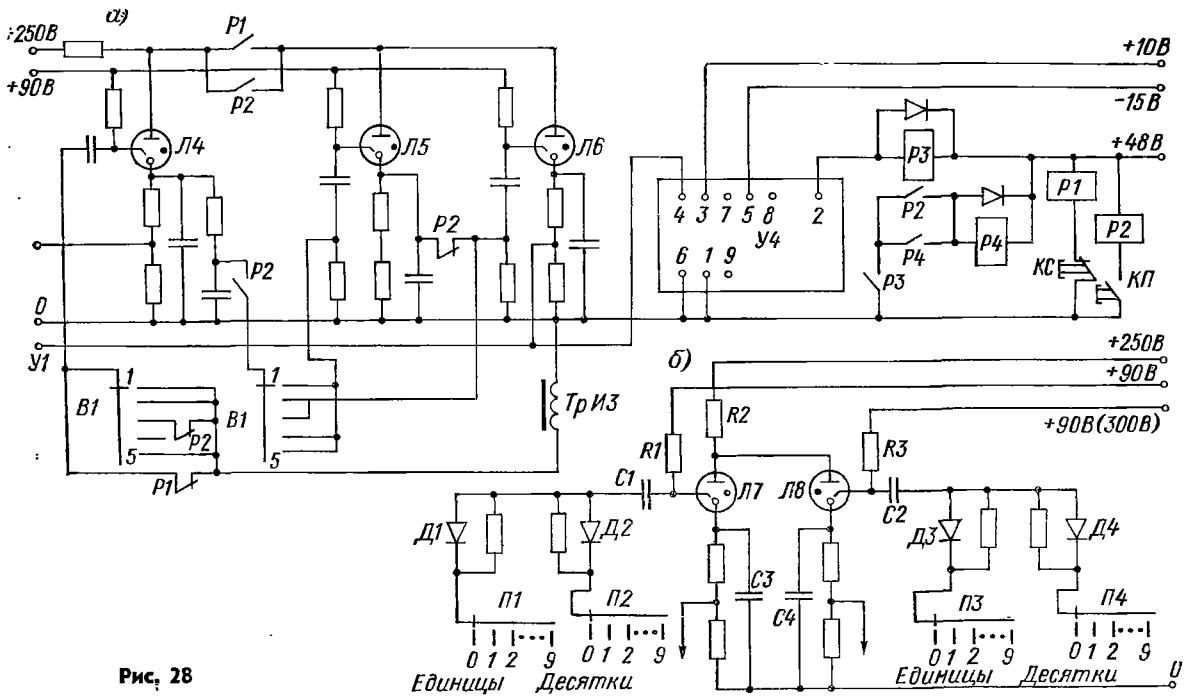


Рис. 28

сятков—импульсы подаются при замыкании контактов выключившихся цикловых реле *P3* и *P4*. Такой режим способствует повышению долговечности декатронов благодаря равномерной нагрузке всех катодов при включенной, но не работающей машине.

В состав блокировочного триггера, кроме тиратрона *Л4*, входят еще два тиратрона *Л5* и *Л6*, усилитель *У4* и реле *P1—P4*. Тиратроны *Л4*, *Л5* и *Л6* имеют общий анодный резистор, а параметры схемы выбраны так, что во включенном состоянии может находиться только один тиратрон. При подаче напряжения на схему включается всегда тиратрон *Л4*, что соответствует исходному нерабочему положению блокировочного триггера. Тиратроны *Л5* и *Л6* не могут включиться, так как напряжение на их аноды подается через контакты реле *P3*, замыкающиеся после его срабатывания.

Для запуска регулятора цикла сварки необходимо перевести в рабочее положение блокировочный триггер, т. е. включить тиратрон *Л6* и цикловые реле. Это осуществляется с помощью пускового реле *P2*, включающегося при нажатии пусковой кнопки *КП*. Предусмотрены два режима пуска—одним или двумя нажатиями пусковой кнопки. Выбор режима производится переключателем *B1*.

В первом случае (второе положение *B1*) при включении реле *P2* сигнал с катода тиратрона *Л4* подается на вход тиратрона *Л6*, который переключается, гасит тиратрон *Л4*, подает сигнал на вход усилителя *У1* (см. рис. 27), включает усилитель *У4* и цикловые реле *P3* и *P4*. Реле, последовательно включаясь, переводят в нулевое положение декатроны-счетчики и подключают к их входам обмотки соответствующих импульсных трансформаторов. Декатроны-счетчики начинают отсчитывать поступающие на вход импульсы до срабатывания схемы сброса по окончании полного времени цикла сварки, как это было описано ранее. Если переключателем *B1* установлен режим работы с автоматическим повторением цикла, то сигнал со схемы сброса не поступает на вход триггера *Л4*, и цикл работы счетчика повторяется многократно до отпускания пусковой кнопки. При отпускании кнопки импульс с обмотки трансформатора *ТрИЗ* по окончании оче-

редного цикла поступает через размыкающий контакт реле $P2$ на вход тиратрона $L4$, который включается и гасит тиратрон $L6$, переводя блокировочный триггер в исходное положение, что прекращает работу счетчика.

Во втором случае (первое положение $B1$) при первом нажатии пусковой кнопки включается реле $P2$ и подает сигнал с катода тиратрона $L4$ на вход тиратрона $L5$, который включается и гасит тиратрон $L4$. При этом снимается сигнал с усилителя, включающего клапан сварочного усилия в приводе сжатия электродов машины. При отпускании пусковой кнопки и выключении реле $P2$ через размыкающий контакт на вход тиратрона $L6$ подается сигнал с катода тиратрона $L5$. Тиратрон $L6$ включается, гасит тиратрон $L5$ и подает сигнал на вход усилителей $У1$ (см. рис. 27) и $У4$, подготавливая включение цикловых реле $P3$ и $P4$, которые включаются при втором нажатии пусковой кнопки и запускают счетчик.

Как указано выше, работа счетчика не зависит от сложности заданного цикла сварки. Количество и последовательность операции определяются подключенными к счетчику исполнительными триггерами. Принципиальная схема триггера приведена на рис. 28,б. Два тиратрона $L7$ и $L8$ имеют общий анодный резистор $R2$ и катодные конденсаторы $C3$ и $C4$. Режим работы тиратронов стабилизирован малым током в цепи управляющих электродов (током подготовки), вызываемым вспомогательным стабилизированным напряжением 90—95 В, включенным через резисторы с большим сопротивлением $R1$ и $R3$.

Сигнал на управляющие электроды тиратронов подается с катодов декатронов-счетчиков через переключатели $П1$, $П2$ и $П3$, $П4$, схемы совпадения, собранные на диодах $Д1$, $Д2$ и $Д3$, $Д4$, и разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$. Выходные сигналы триггера снимаются с катодных резисторов и подаются на входные транзисторы усилителей. Для приведения триггера в положение, принятое за исходное, на управляющий электрод одного из тиратронов до начала цикла вместо стабилизирующего напряжения 90 В подается повышенное напряжение порядка 300 В, поддерживающее его включенным. При запуске цик-

ла повышенное напряжение снимается цикловым реле, и триггер готов к принятию сигналов от счетчика, поступающих в моменты появления разрядов в декатронах-счетчиках на катодах, к которым подключены переключатели *П1*, *П2* и *П3*, *П4*.

Кроме основных исполнительных триггеров, имеется еще дополнительный триггер (блок 24 по структурной схеме рис. 22), задающий пульсации тока. Его тиатроны подключаются не к двум, а к одному декатрону—множителю или счетчику единиц. За один цикл сварки этот триггер переключается столько раз, сколько циклов счета совершит декатрон, к которому подключены тиатроны триггера. Этим и определяется число пульсаций тока.

В станциях управления, разработанных в последние годы, счетчик импульсов, множитель и триггеры выполнены на транзисторных элементах системы «Логика». Каждая декада счетчика состоит из четырех триггеров, соединенных по схеме со счетным входом, и пяти диодных элементов, образующих десять выходных цепей декады. Исполнительные транзисторные триггеры подключаются к выходам декад счетчика через диодные элементы (схема И). Включение исполнительных элементов машины осуществляется триггерами через транзисторные усилители.

В машинах постоянного тока применяются и регуляторы с последовательным отсчетом времени операций цикла сварки, в которых команды на исполнительные элементы машины поступают от коммутатора операций. Однако клапан включения ковочного усилия и в этом случае управляется отдельным, независимым триггером, а отсчет заданного времени включения ковочного усилия производится параллельно с отсчетом времени той операции, в ходе которой должна быть выдана команда на повышение усилия.

4. Контроль работы станции управления

Структурная схема блока контроля станции приведена на рис. 29. Блок позволяет контролировать длительность любой операции цикла сварки. На входной усилитель 1 блока контроля подаются им-

пульсы напряжения частотой 150 Гц от формирователя импульсов, сигнал от одного из триггеров регулятора цикла сварки и импульсы напряжения от трансформаторов с тороидальными ферритовыми магнитопроводами, включенных в анодные цепи силовых управляемых вентилях. Контролируемая операция выбирается с помощью переключателя, подающего на вход усилителя сигнал с соответствующего триггера.

Контроль длительности прохождения сварочного тока осуществляется по фактическому количеству

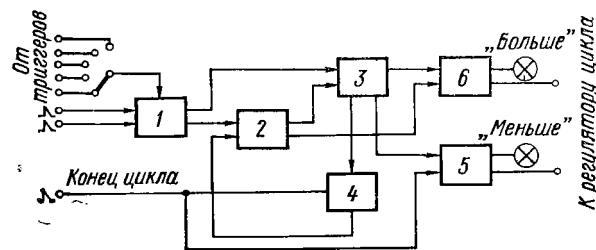


Рис. 29

включений управляемых вентилях на первичной стороне сварочного трансформатора. При включении каждого вентиля во вторичной обмотке тороидального трансформатора, включенного в его анодную цепь, появляется импульс напряжения. Импульсы с трех или шести (в машинах с шестью силовыми управляемыми вентилями) тороидальных трансформаторов поступают на один из входов усилителя блока контроля. Одновременно на другой вход усилителя поступает сигнал от контролируемого триггера тока. С выхода усилителя импульсы поступают на вход пересчетного декатрона (с коэффициентом деления соответственно три или шесть) — счетчика импульсов 2. От пересчетного декатрона импульсы частотой 50 Гц подаются на три основных декатрона-счетчика, работающих аналогично декатронам регулятора цикла сварки. К декатронам — счетчикам единиц и десятков — с помощью двух переключателей, задающих контролируемую длительность операции, подключается один из входов контрольного триггера 3. На другой вход контрольного триггера подается сигнал от

входного усилителя 1 в начале контролируемой операции. При отсчете декатронами-счетчиками заданного числа импульсов на втором входе триггера 3 появляется сигнал, и триггер переключается, подавая, в свою очередь, сигнал на один из входов усилителя сброса 4. По окончании цикла сварки на второй вход усилителя сброса приходит сигнал от регулятора цикла. Усилитель 4 сбрасывает счетчик 2 в исходное положение, и вся схема блока контроля вновь готова к работе.

Если вследствие нарушений в работе схемы формирователя импульсов, регулятора цикла или нечетной работы силовых управляемых вентилях число импульсов за время сварки окажется меньше заданного, то по окончании контролируемой операции на втором входе контрольного триггера 3 сигнал не появится. Триггер останется в исходном положении, и выходной сигнал с него поступит не на усилитель сброса 4, а на один из входов контрольного усилителя 5. По окончании цикла сварки от регулятора цикла поступит сигнал на второй вход усилителя 5. При этом включится выходной тиристор усилителя, загорятся сигнальная лампа «меньше», сигнальная лампа «защита» на пульте управления и запуск следующего цикла будет запрещен. Декатрон — контрольный счетчик 2 — не сбросится, и по его положению можно определить фактическую длительность импульса сварочного тока. Схема приводится в исходное положение нажатием кнопки «сброс» на блоке контроля.

Если после отсчета счетчиком 2 заданного числа импульсов и переключения триггера 3 сварочный ток не выключится, то первый же лишний импульс, поступивший на вход контрольного усилителя 6, вызовет его включение. При этом выключится ключевой усилитель отпирающих импульсов (15 по структурной схеме рис. 22), разорвутся цепи включения управляемых вентилях загорятся сигнальная лампа «больше», сигнальная лампа «защита» на пульте управления машины и запуск следующего цикла будет запрещен. Возврат схемы в исходное положение осуществляется кнопкой «сброс».

При контроле времени других операций цикла сварки схема блока контроля работает аналогично, но

на вход счетчика 2 подаются через усилитель 1 импульсы от формирователя.

Кроме основной контрольной схемы, в блоке контроля имеется переключатель, который подает на выходные клеммы сигналы с основных ключевых точек схемы станции управления, что облегчает контроль ее работы и обнаружение неисправностей с помощью электронного осциллографа.

Глава четвертая

НАЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МАШИН

1. Подключение и подготовка к работе

Машины постоянного тока, как и контактные машины других типов, требуют для работы подключения к электрической сети, сети сжатого воздуха, водопроводной магистрали и заземления. В связи с наличием во вторичном контуре машин кремниевых вентилях, требующих непрерывного интенсивного водяного охлаждения, расход охлаждающей воды машин постоянного тока выше, чем у машин других типов. Также выше требования к чистоте охлаждающей воды, так как каналы системы охлаждения вентилях имеют много изгибов, способствующих оседанию загрязнений и осадков. Охлаждающая вода должна отвечать требованиям ГОСТ 14069—72: жесткость воды должна быть не более 3,56 мг-экв/л, электрическое сопротивление должно быть не менее 2 кОм·см, нерастворимых осадков должно содержаться не более 0,05 мг/л. Оптимальной для группы машин является замкнутая система охлаждения.

Блоки вентилях, как правило, включаются в систему охлаждения последовательно по три. Это относится к основной ветви охлаждения, в которую входят групповые охладители вентилях. Последовательно с каждой такой ветвью охлаждения в машинах включается реле контроля расхода воды. Работу этих реле необходимо проверить сразу же после подключения машины к водопроводной магистрали. Реле должны

Включать и выключать соответствующую электрическую цепь при указанном в описании машины расходе воды через контролируемую ветвь. Работа реле должна контролироваться по сигнальной лампе «вода» на пульте и станции управления машины.

У машин постоянного тока нет особых требований к сети сжатого воздуха. Сечение трубы или шланга, подводящего воздух к машине, не должно быть ниже указанного в описании. Давление воздуха на входе в машину при работе ее в номинальном режиме не должно падать ниже 0,5 МПа. Для машин с гидравлическим приводом сжатия электродов, естественно, вообще не требуется сети сжатого воздуха.

Подключать машины постоянного тока к электрической трехфазной сети надо обязательно через автоматический выключатель, имеющий в каждой фазе мгновенную максимальную защиту с плавной настройкой, обеспечивающей установку тока срабатывания 1,1—1,2 от номинального во время сварки. Автоматический выключатель такого типа должен входить в комплект поставки машины. Его необходимость объясняется тем, что напряжение на сварочном контуре машины постоянного тока, как правило, не превышает половины напряжения холостого хода трансформатора и дополнительные замыкания в контуре не приводят к возрастанию тока в несколько раз, что необходимо для срабатывания автоматических выключателей с максимальной защитой от коротких замыканий.

Все машины постоянного тока имеют автоматическую стабилизацию сварочного тока, работающую при колебаниях напряжения сети на $\pm 10\%$ от номинального. Учитывая, что напряжение питающего силового трансформатора может изменяться в соответствии с нормами на 5%, машину необходимо подключать кабелем такого сечения, чтобы падение напряжения на нем за счет работы машины в номинальном режиме не превышало 5%. В случае если сечение применяемого кабеля меньше необходимого и для питания машины используются два или три трехжильных кабеля, жилы каждого кабеля должны подключаться ко всем трем фазам питающей сети. Это необходимо для уменьшения индуктивного сопротивления питаю-

щей линии и снижения падения напряжения при коммутации линейных токов.

Корпус машины заземляется в соответствии с ПУЭ. Вторичные витки сварочного трансформатора заземляются через токоподвод сварочного контура, соединенный с корпусом машины. В случае внесения каких-либо конструктивных изменений в сварочный контур необходимо следить за тем, чтобы с корпусом машины был соединен тот токоподвод, который подключен к сборной шине выпрямителя, соединенной со вторичными витками трансформатора нулевыми шинами блоков вентиляей.

При прохождении сварочного тока в контуре машины запасается значительная энергия. В случае размыкания электродов машины во время прохождения сварочного тока, например при защитном отключении автоматического выключателя или при срабатывании схемы защиты, на электродах возникает мощная дуга. Во избежание этого пневматическая схема и схема управления выполнены так, что при снятии напряжения со всех клапанов привода сжатия электроды машины сжимаются. Это следует помнить при эксплуатации машины и проведении наладочных работ.

2. Измерение сопротивления элементов вторичного контура машины постоянному току

Вторичный контур машины постоянного тока представляет собой разветвленную цепь, содержащую нелинейные элементы — полупроводниковые вентили, что следует учитывать при проведении измерений. Измерения лучше всего проводить, как и в машинах переменного тока, с помощью генератора или выпрямителя с падающей характеристикой для дуговой сварки при токах 200—500 А. Для измерений по методу амперметра-вольтметра необходимы измерительный шунт на соответствующий ток с милливольтметром и второй милливольтметр на 10—15 мВ со щупами. Провода от источника постоянного тока изолируют друг от друга прокладкой и зажимают между электродами машины. Меняя полярность подключения проводов, проверяют, чтобы при обратной для

вентилей полярности в цепи не было тока, что свидетельствует об отсутствии короткозамкнутых вентилей и других замыканий в силовом выпрямителе машины. При появлении тока в этом случае необходимо проследить его путь, подключая щупы милливольтметра поочередно к различным участкам контура, обнаружить и устранить замыкание или неисправный вентиль. После этого полярность подключения проводов изменяют на прямую и проводят замеры падения напряжения при установившемся токе на участках сварочного контура от электродов до сборных шин, к которым подключены блоки вентилей.

Измеренное сопротивление сварочного контура не должно превышать значения, указанного в описании машины. Если сварочный контур машины состоит из двух параллельных ветвей, необходимо поочередно замерить сопротивление каждой ветви, отключив другую. Сопротивления параллельных ветвей не должны отличаться друг от друга более чем на 5—10%.

Кроме сопротивлений элементов сварочного контура, необходимо замерить сопротивления фазных цепей выпрямителя, включающих в себя вторичные витки трансформатора, гибкие шины от витков трансформатора к блокам вентилей, нулевые шины блоков вентилей и переходные контактные сопротивления между указанными элементами. Сопротивления аналогичных фазных цепей также не должны отличаться друг от друга более чем на 10%.

3. Проверка работы и настройка автоматической стабилизации сварочного тока

Проверка точности стабилизации сварочного тока при изменении напряжения питающей сети может производиться как при включении силового выпрямителя машины, так и по модели силового выпрямителя без его включения. В первом случае машина подключается к трехфазному регулятору напряжения. Силовой выпрямитель машины работает в режиме, близком к холостому ходу. Между электродами машины через изоляционную прокладку зажимают концы от нагрузочного сопротивления 0,01—0,1 Ом, в качестве которого можно использовать балластный реостат типа

РБ-300. К этому сопротивлению подключают вольтметр магнитоэлектрической системы с верхним пределом измерения порядка 10 В. Машину запускают по циклу, выбирая такое время сварки, чтобы стрелка вольтметра успела установиться. Изменяя регулятором питающее напряжение в пределах $\pm 10\%$ от номинального, по вольтметру определяют пределы изменения напряжения на сопротивлении нагрузки, т. е. ток нагрузки.

При отсутствии трехфазного регулятора напряжения изменение напряжения питающей сети имитируется переключением числа витков первичной обмотки трехфазного трансформатора станции управления. Значение выпрямленного напряжения при этом определяют по показаниям вольтметра магнитоэлектрической системы на выходе модели силового выпрямителя.

Для настройки стабилизации необходимо переключатель *B3* («модуляция») поставить в положение «выключено», а переключатель *B2* (см. рис. 26) — в положение «импульс 2» (основной импульс). На выход силового выпрямителя или его модели (в зависимости от того, как производится настройка) подключают электронный осциллограф, позволяющий следить за формой выпрямленного напряжения. Устанавливают питающее напряжение 340 В (нижний предел диапазона стабилизации). Переключатель тока *B1* («нагрев») основного импульса ставят в положение *11*, соответствующее максимальному значению выпрямленного напряжения; движок переменного резистора *R1* настройки нелинейного сопротивления переводят в крайнее положение, при котором с него снимается минимальное напряжение. Поворачивая движок переменного резистора *R3*, устанавливают, контролируя режим по электронному осциллографу, выпрямленное напряжение, соответствующее полнфазному выпрямлению. При этом отмечают показание вольтметра, включенного на выпрямленное напряжение. Отмеченное показание соответствует максимальному току (100%). Затем переключатель *B1* переводят в положение *1*. Вращая движок переменного резистора *R26*, устанавливают желательное минимальное значение выпрямленного напряжения в процентах

от его значения при полнофазном выпрямлении. После этого переключатель *В1* возвращают в положение *11* и параллельно транзистору *Т1* узла нелинейного сопротивления включают высокоомный вольтметр. Вращая движок переменного резистора *Р1* и увеличивая питающее напряжение, добиваются того, чтобы транзистор *Т1* начал открываться при питающем напряжении в диапазоне 340—345 В и был полностью открыт при напряжении, близком к 380 В. Затем питающее напряжение повышают до 420 В (верхний предел стабилизации) и, вращая движок переменного резистора *Р3*, устанавливают значение выпрямленного напряжения возможно ближе к ранее отмеченному при напряжении питания 340 В и полнофазном выпрямлении. После этого вновь уменьшают питающее напряжение до 340 В и резистором *Р15* восстанавливают режим полнофазного выпрямления.

Настроив таким образом стабилизацию при максимальном токе, переключатель *В1* («нагрев») переводят в положения *10*, *9*, *8* и т. д. Изменяя питающее напряжение в диапазоне 340—420 В, проверяют изменение значения выпрямленного напряжения. Подстраивают, если это необходимо, стабилизацию резисторами *Р3* и *Р15* во всех положениях переключателя. По окончании настройки стабилизации переключатель *В1* вновь переводят в положение *11*, питающее напряжение уменьшают ниже 340 В до срыва работы выпрямителя и, вращая движок резистора *Р27*, восстанавливают режим полнофазного выпрямления, контролируя режим работы выпрямителя по осциллографу.

4. Измерение выпрямленного тока

Для наблюдения формы выпрямленного (сварочного) тока, определения относительной глубины пульсаций и сравнения относительных значений тока при изменении режима сварки можно применять приборы, основанные на использовании эффекта Холла в полупроводниках, например прибор типа ДСТ-2М [4]. Чувствительным элементом прибора ДСТ-2М является пластинка из арсенида индия, помещенная в небольшой кожух. К пластинке подводится постоянный

ток питания, и снимается выходной сигнал, пропорциональный питающему току и напряженности магнитного поля, пересекающего пластинку перпендикулярно ее поверхности.

Чувствительный элемент прибора устанавливается при измерениях на каком-либо участке сварочного контура машины, желательно с небольшим поперечным сечением токопровода, например на электродержателе, так, чтобы линии магнитного поля выпрямленного тока были перпендикулярны плоскости элемента. При всех дальнейших измерениях положение элемента не должно меняться.

Выходной сигнал прибора может быть подан на электронный осциллограф или записан с помощью шлейфного осциллографа. Измерение абсолютной величины выпрямленного тока и градуировку сигнала, получаемого с преобразователя Холла, можно производить с помощью осциллографирования первичных токов трансформатора. Для этого последовательно с обмотками трансформатора включают измерительные шунты.

Выпрямленный ток определяют по формуле

$$I_{свн} = 0,95k \frac{I_{1фн} + I_{2фн} + I_{3фн}}{3},$$

где $I_{1фн}$, $I_{2фн}$, $I_{3фн}$ — максимальные значения первичного тока трех фаз трансформатора; k — коэффициент трансформации на данной ступени включения; 0,95 — коэффициент, учитывающий наличие в первичном токе намагничивающей составляющей.

Мощность, потребляемую машиной из сети, определяют как

$$P = 380 \cdot 0,95 \frac{I_{1фн} + I_{2фн} + I_{3фн}}{3} \sqrt{2}.$$

В данной формуле коэффициент 0,95 учитывает пульсации выпрямленного тока.

Разработаны и выпускаются в небольших количествах специальные приборы АСА-1 и АСУ-1М для непосредственного измерения сварочного тока контактных машин, в том числе и машин постоянного тока [4]. Воспринимающим элементом этих приборов является катушка-тороид, намотанная на немагнит-

ном основании. Тороид должен располагаться вокруг элемента вторичного контура машины. Показывающим элементом приборов АСА-1 и АСУ-1М является стрелочный прибор, отсчет по которому непосредственно в килоамперах может быть снят после прохождения импульса сварочного тока благодаря тому, что в схеме имеется запоминающее устройство. В приборе АСУ-1М имеются выходные клеммы, с которых может быть снят сигнал, пропорциональный измеряемому току, для наблюдения формы тока на экране осциллографа.

5. Особенности выбора режимов сварки

Технологические особенности машин постоянного тока определяются прежде всего формой кривой сварочного тока. Благодаря трехфазному выпрямлению и большой индуктивности сварочного контура кривая тока имеет плавную форму с малой глубиной пульсаций при неограниченной длительности импульса тока. Это обуславливает непрерывный нагрев деталей и позволяет за время сварки ввести в соединение необходимую энергию при минимальном мгновенном значении мощности. Для наиболее полного использования этой особенности машин сварку следует вести на такой ступени включения сварочного трансформатора, которая обеспечивает получение необходимого значения сварочного тока при минимальных углах фазового регулирования. Это, кроме того, обеспечивает потребление из сети минимальной мощности при максимальном коэффициенте мощности.

При одинаковых значениях индуктивности сварочного контура постоянная времени, определяющая скорость нарастания тока, у машин постоянного тока приблизительно в полтора раза меньше, чем у машин переменного тока низкой частоты [13]. Благодаря этому скорость нарастания тока и энергия, выделяющаяся в свариваемом соединении в начальный период нагрева, выше при сварке на постоянном токе. Такое повышение энергетической эффективности процесса сварки позволяет получить при сварке на постоянном токе соединение тех же размеров, что и на переменном токе

низкой частоты, при том же времени сварки и меньшем максимальном значении тока. Так, при сварке деталей из сплава АМг6 толщиной 4,5+4,5 мм на машине МТВ-8001 сварная точка диаметром 14—15 мм может быть получена при максимальном значении тока 75 кА, а рекомендуемый максимальный ток при сварке на машине МТПТ-600—96 кА.

Возможность производить сварку одного соединения двумя или тремя импульсами тока с уменьшением паузы между ними до нулевой позволяет применять импульсы тока практически любой формы, наиболее целесообразной для сварки тех или иных деталей. С помощью модуляции основного импульса может быть получено замедленное нарастание тока, а при включении перед основным короткого дополнительного импульса с большей уставкой тока нарастание тока может быть сделано более крутым, чем естественное. Может быть получен плавный или ступенчатый спад тока.

Все это в сочетании со свободным регулированием моментов изменения усилия сжатия электродов делает машины постоянного тока наиболее технологически универсальными из всех видов оборудования для контактной сварки.

Глава пятая

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В настоящее время машины постоянного тока нашли применение главным образом для точечной и шовной сварки крупногабаритных изделий. В этой области использование однофазных машин переменного тока промышленной частоты нецелесообразно в связи с весьма большой потребляемой мощностью. Машины постоянного тока вытесняют машины низкой частоты. Мощность, потребляемая машинами низкой частоты при сварке деталей, для которых достаточно одной полуволны тока, например при сварке деталей

из алюминиевых сплавов, несколько ниже мощности, потребляемой машинами постоянного тока. Однако если для сварки требуется время, превышающее длительность одной полуволны тока низкой частоты, то вследствие плавного нарастания и снижения мгновенного значения тока при переходе его через нулевое значение и наличия неизбежных пауз амплитудное значение тока низкой частоты значительно превышает действующее значение. При этом потребляемая мощность становится больше, чем у машин постоянного тока. Так, при питании машины типа МТВ-6302 (см. табл. 3) током частотой 4,5 Гц потребляемая из сети мощность составит 1000 кВ·А.

Размеры и масса сварочного трансформатора машин с преобразованием частоты и числа фаз на первичной стороне растут с уменьшением частоты. Так, в машине, предназначенной для сварки деталей из алюминиевых сплавов толщиной 7+7 мм одной полуволной тока, масса сварочного трансформатора составляет 18 т, а общая масса машины — 30 т. Масса машины постоянного тока типа МТВ-16001, имеющей более широкие технологические возможности как по сварке алюминиевых сплавов, так и по сварке сталей, в два раза меньше за счет снижения массы сварочного трансформатора, работающего на напряжении промышленной частоты.

Машины постоянного тока имеют более простую электрическую силовую схему по сравнению с машинами низкой частоты, в которых для обеспечения нормальной работы сварочного трансформатора необходимо менять полярность подводимого к нему напряжения. В связи с этим преобразователь на первичной стороне сварочного трансформатора машин низкой частоты состоит из двух выпрямителей, работающих поочередно, или из выпрямителя и инвертора. Нарушение в работе одного из выпрямителей или инвертора приводит к короткому замыканию фаз питающей сети. Для предотвращения этого в схему необходимо вводить защитные устройства. Этого не требуется в машинах постоянного тока, в связи с чем схемная надежность их выше, чем у низкочастотных машин. В первой главе было показано, что управляемые вентили на первичной стороне машин постоянного тока

работают в весьма благоприятных условиях, что также повышает надежность работы машин.

Кроме того, машины постоянного тока обладают рядом достоинств, расширяющих область их применения. Значение выпрямленного тока практически не зависит от индуктивности сварочного контура, благодаря чему сварочный ток не изменяется при внесении в контур машины массивных ферромагнитных деталей и приспособлений. Потребляемая мощность мало увеличивается при увеличении вылета электродов и раствора сварочного контура. Сварочный ток более равномерно распределяется между несколькими одновременно свариваемыми соединениями, например при рельефной сварке. Плавная кривая тока с малой амплитудой пульсаций позволяет получить без угрозы выплеска расплавленного металла максимальный размер соединения и соответствующую прочность при сварке сплавов, имеющих узкую зону свариваемости, например сплавов на основе никеля. Это преимущество проявляется особенно сильно при уменьшении толщины свариваемых деталей, а также при сварке разнотолщинных деталей, например при изготовлении сотовых конструкций [17].

При шовной сварке постоянным током непрерывный нагрев деталей позволяет получить большую скорость, чем при сварке переменным током промышленной частоты, во всем диапазоне свариваемых толщин. Особенно существенно повышение скорости сварки для деталей малой толщины (менее 0,8 мм). Так, для деталей толщиной 0,5 мм максимальная скорость сварки на постоянном токе в 2,5 раза выше, чем на переменном токе промышленной частоты. Для деталей толщиной от 0,8 до 3 мм — в 1,3—1,7 раза. Повышение максимальной скорости сварки на постоянном токе деталей толщиной более 0,8 мм, в которых порции тепла, соответствующие полуволнам переменного тока, успевают усредняться при данной скорости, объясняется характером выделения тепла в контакте ролик — деталь, определяемым для каждой точки поверхности детали соответствующим мгновенным значением тока [18].

При скоростной рельефно-роликовой сварке и шовной сварке с раздавливанием кромок на постоянном

токе получается более равномерный шов. Значительно повышаются качество соединения и производительность при шовно-стыковой сварке труб.

Весьма перспективным представляется применение постоянного тока для питания многоэлектродных машин и автоматических линий. Благодаря малому росту потребляемой мощности при увеличении сварочного контура в ряде случаев целесообразно питать все электроды машины от одного источника постоянного тока при поочередной сварке точек. При этом возможна сварка как с односторонним, так и с двусторонним подводом тока. В случае двустороннего подвода тока все электроды, установленные с одной стороны свариваемого изделия, подключаются к одному разветвленному токоподводу, проходящему вдоль линии расположения сварных точек, а все электроды, установленные с другой стороны свариваемого изделия, подключаются к другому аналогичному токоподводу. Токоподводы присоединяются к полюсам источника постоянного тока противоположными концами, что обеспечивает одинаковые сопротивления сварочных контуров, образующихся при сварке различных точек.

В случае одностороннего подвода тока одновременно работающая пара электродов, подключенных к источнику постоянного тока, может располагаться на большом расстоянии друг от друга. Благодаря этому при сварке нескольких деталей с одной общей деталью, например набора элементов жесткости с общей обшивкой, эти электроды осуществляют сварку двух точек на разных элементах жесткости, что практически исключает шунтирование тока и повышает качество сварки. Для обеспечения одинакового сопротивления сварочных контуров, образующихся при сварке различных пар точек, одновременно работающие пары электродов подключаются к двум развитым токоподводам, которые присоединяются к полюсам источника постоянного тока также противоположными концами.

Применение одного общего источника постоянного тока взамен многих сварочных трансформаторов, используемых в настоящее время в многоэлектродных машинах, позволяет существенно упростить конструк-

цию машины и повысить качество сварки за счет устранения шунтирования.

Перспективно применение постоянного тока для питания подвесных клещей. Это позволит значительно увеличить вылет и раствор клещей практически без увеличения потребляемой мощности. При сварке на постоянном токе многократно снижаются по сравнению со сваркой на переменном токе пульсирующие электродинамические усилия, действующие на отдельные проводники гибкого вторичного кабеля. Благодаря этому существенно повышается стойкость кабеля, особенно при использовании двух отдельных кабелей. В этом случае отпадает необходимость стягивания между собой двух кабелей, что повышает маневренность клещей и облегчает условия труда.

Применение постоянного тока будет иметь существенные преимущества при создании ряда различных специализированных машин, в которых электроды перемещаются относительно свариваемого изделия, изменяя конфигурацию сварочного контура. При этом индуктивность контура изменяется, а активное сопротивление может поддерживаться неизменным, что достаточно для обеспечения стабильного качества сварки на постоянном токе.

Рассмотренные достоинства оборудования для контактной сварки постоянным током позволят по мере удешевления силовых полупроводниковых вентилей и улучшения их характеристик значительно увеличить выпуск оборудования и расширить область его применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Б. С., Зайчик Л. В. Машина для контактной сварки. А. С. № 224720 СССР. Оpubл. в бюл. «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1968, № 26, с. 75.
2. Бокштейн О. Н., Зайчик Л. В., Канин А. М. Оборудование для контактной сварки выпрямленным током. — «Сварочное производство», 1970, № 9, с. 41—43.
3. Бокштейн О. Н., Канин А. М., Песенсон А. Е. Машина для контактной сварки. А. С. № 410898 СССР. Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1974, № 2, с. 38.
4. Глубов Л. В., Филиппов Ю. И., Чулошников П. Л. Установка и эксплуатация машин контактной сварки. Л., «Энергия», 1973. 296 с. с ил.
5. Зайчик Л. В., Канин А. М. Точечные машины типа МТИП. — «Сварочное производство», 1956, № 8, с. 18—23.
6. Зайчик Л. В., Канин А. М. Трехфазное выпрямительное устройство. А. С. № 145673 СССР. Оpubл. в бюл. «Бюллетень изобретений и товарных знаков», 1962, № 6, с. 40.
7. Зайчик Л. В., Канин А. М. Низковольтный многофазный выпрямитель. А. С. № 246749 СССР. Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1969, № 21, с. 73.
8. Зайчик Л. В., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л. Контактная электросварка легких сплавов. М., Машгиз, 1963. 220 с. с ил.
9. Земляной Ю. М. Трехфазный выпрямитель. А. С. № 163781 СССР. Оpubл. в бюл. «Бюллетень изобретений и товарных знаков», 1965, № 5, с. 45.
10. Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. Ч. 3. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956. 528 с. с ил.
11. Кораблев Л. Н. Лампы с холодным катодом. М., Изд-во АН СССР, 1961. 176 с. с ил.
12. Липкин В. М. Декатроны и их применение. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960. 64 с. с ил.
13. Машина МТВ-8001 для точечной сварки крупногабаритных изделий. — «ЭП. Сер. Электросварка», 1973, вып. 5(20), с. 3—6. Авт.: Б. С. Алексеев, Л. Ф. Альфер, О. Н. Бокштейн, А. М. Канин.
14. Машина МТВ-16001 для точечной сварки крупногабаритных изделий большой толщины. — «ЭП. Сер. Электросварка», 1973, вып. 5(20), с. 6—8. Авт.: Б. С. Алексеев, Л. Ф. Альфер, О. Н. Бокштейн, А. М. Канин.
15. Рыськова З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки. Изд. 2-е. Л., «Энергия», 1975. 280 с. с ил.

16. Шляпошников Б. М. Игнитронные выпрямители. М., Трансжелдориздат, 1947. 735 с. с ил.
17. Denis J., Morland J.-P. Le soudage par resistance sous courant a' faible taux d'ondulation. — «Soudage et Tech. conn.», 1973, № 11/12, p. 455—474.
18. Toshio Yumamoto, Takio Okuda. Direct current seam welding. — «Мицубиси дэнки шхэ», 1972, № 3, с. 389—395.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Силовые электрические схемы машин постоянного тока	5
1. Особенности работы выпрямителя в контактных машинах	—
2. Схемы выпрямителей с вентильным управлением на первичной стороне трансформатора	6
3. Работа трехфазного выпрямителя	19
Глава вторая. Особенности конструкции машин постоянного тока	55
1. Общая компоновка машин	—
2. Конструкция блока силовых вентилей	57
3. Циклограмма работы машин	61
Глава третья. Схема управления машин	65
1. Структурная схема станции управления	—
2. Управление сварочным током	69
3. Управление циклом сварки	79
4. Контроль работы станции управления	86
Глава четвертая. Наладка и эксплуатация машин	89
1. Подключение и подготовка к работе	—
2. Измерение сопротивления элементов вторичного контура машины постоянному току	91
3. Проверка работы и настройка автоматической стабилизации сварочного тока	92
4. Измерение выпрямленного тока	94
5. Особенности выбора режимов сварки	96
Глава пятая. Область применения машин постоянного тока	97
Список литературы	102

Олег Натанович Бокштейн,
Александр Михайлович Канин

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ**

Редактор Л. М. Пархоменко
Художественный редактор Б. П. Кузнецов
Технический редактор О. С. Житникова
Корректор З. В. Лобова
Сдано в набор 16/VI 1976 г. Подписано к печати 24/IX 1976 г.
М-23210 Формат 84×138/32. Бумага типографская № 2
Усл.-печ. л. 5,46 Уч.-изд. л. 4,92 Тираж 15 000 экз.
Заказ 742. Цена 26 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия».
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.