

# МНОГОЯЧЕЙКОВЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ТОКА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ УСТАНОВОК КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

Ю.Э. Паэранд, А.Ф. Бондаренко, Ю.В. Бондаренко  
Донбасский государственный технический университет  
Кафедра ЭС, ДонГТУ, пр. Ленина 16, г. Алчевск, 94204, Украина  
Тел. +38 (06442) 2-02-02, e-mail: paerand@mail.ru, bondarenkoaf@gmail.com, bondarenko.julie@gmail.com

**Annotation** – The overview and analysis of effective constructing principles of current transistor regulators are given. Multi-cell-type current transistor regulator with combined mode of transistor work for micro resistance welding is offered.

**Key words** – current transistor regulator, combined mode of transistor work, multicell-type construction.

## ВВЕДЕНИЕ

В различных электронных устройствах и системах находят применение транзисторные регуляторы постоянного тока и напряжения. В установках контактной микросварки, широко используемых для соединения малогабаритных деталей электронных компонентов и приборов различного назначения, регулятор тока реализует необходимый закон изменения сварочного импульса и является одним из наиболее ответственных узлов формирователя импульсов. Качество сварных соединений, получаемых с помощью контактной микросварки, непосредственно зависит от точности отработки заданного закона изменения сварочного импульса, которая, в свою очередь, определяется способом построения регулятора сварочного тока и эффективностью его управления.

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема формирователя импульсов для контактной микросварки, где: ФИ – формирователь импульсов, ИСТ – источник сварочного тока, РСТ – регулятор сварочного тока, СУ – система управления регулятором сварочного тока, Н – нагрузка (сварочный контакт).

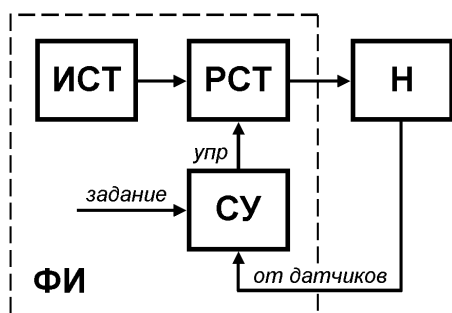


Рис. 1

При проектировании регуляторов тока для установок контактной микросварки необходимо учитывать специфические требования, предъявляемые к формируемому сварочному импульсу, а именно: малую длительность импульса (сотни микросекунд – единицы миллисекунд) и специальный закон его изменения [1].

Известно [1], что высокое качество сварного соединения может быть получено путем пропускания через сварочный контакт импульса тока, мощность которого изменяется следующим образом: на начальном этапе плавно нарастает по степенному закону, а затем стабилизируется на заданном уровне до окончания сварки. Указанный характер изменения импульса описывает выражение (1).

$$P_{CB}(t) = \begin{cases} P_{CBmax} \cdot \left(\frac{t}{t_\phi}\right)^n, & t_0 \leq t \leq t_1; \\ P_{CBmax}, & t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_{CB}$  – мощность сварочного импульса;  
 $P_{CBmax}$  – максимальное значение мощности;  
 $t_\phi$  – время формирования фронта импульса;  
 $n$  – показатель степени, который определяется конкретными условиями сварки.

Кривая изменения мощности в соответствии с (1) при  $n = 2$  изображена на рис. 2.

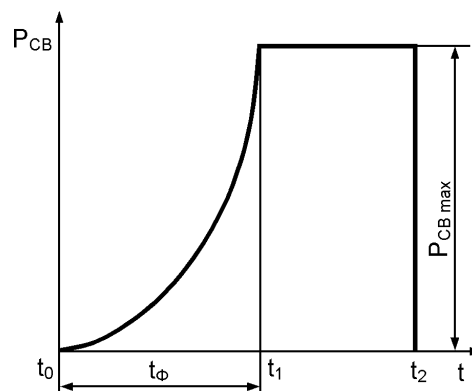


Рис. 2

Наилучших показателей точности отработки необходимого закона изменения сварочного импульса можно достичь при использовании активного режима работы силовых транзисторов регулятора, который в этом случае обладает высокими линейностью и быстродействием [2].

Однако применение активного режима сопряжено со значительными потерями мощности, рассеиваемой транзисторами регулятора сварочного тока при формировании импульса, следствием чего является низкий КПД схемы формирователя.

Целью данной работы является обзор известных принципов и способов построения регуляторов тока, позволяющих обеспечить высокий КПД схемы при эффективном регулировании, а также поиск решения, оптимального при реализации регулятора сварочного тока формирователя импульсов для установок контактной микросварки.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ  
РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА  
С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В зависимости от конкретного применения к транзисторным регуляторам постоянного тока (напряжения) могут предъявляться различные требования, которые определяют принципы их построения. В случаях, когда необходимо получить исключительно высокое качество выходного сигнала (высококачественная звуковоспроизводящая аппаратура, прецизионные регуляторы скорости вращения двигателей, высокостабильные источники питания и др.), применяют непрерывный режим работы транзисторов регулятора. Если к качеству сигнала не предъявляются высокие требования, но при этом критическим является КПД устройства (источники питания для установок индукционного нагрева, бытовых электроприборов и электроинструментов и др.), используют импульсный режим работы. Объединить достоинства этих двух режимов работы транзисторов и существенно снизить влияние их недостатков можно путем использования комбинированных режимов работы.

Известен способ построения регулятора тока, при котором необходимую форму сигнала получают с помощью полупроводникового ключа с широтно-импульсным управлением и силового транзистора в активном режиме: ключ задает приближенный к требуемому уровень сигнала, а непрерывно управляемый транзистор доводит сигнал до необходимой точности [3, 4]. На рис. 3, 4 и 5 в виде структурных схем показано несколько вариантов реализации этого способа построения регулятора тока. На рисунках использованы следующие сокращения: ИТ – источник тока, РТ – регулятор тока, К – полупроводниковый ключ, Т – непрерывно управляемый транзистор, Н – нагрузка.

При параллельном соединении ключа и транзистора между собой и последовательном их соединении с нагрузкой (рис. 3) регулирование тока может производиться только в сторону увеличения относительно его текущего значения, обеспечиваемого ключом.

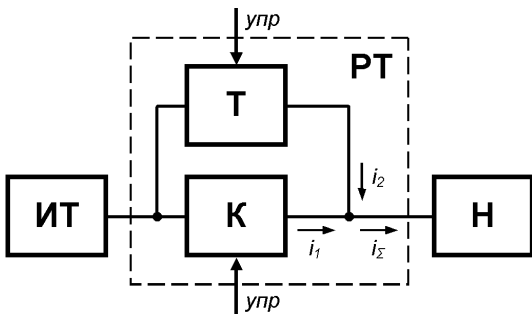


Рис. 3

При параллельном соединении транзистора с нагрузкой и последовательном их соединении с ключом (рис. 4) регулирование может производиться только в сторону уменьшения тока.

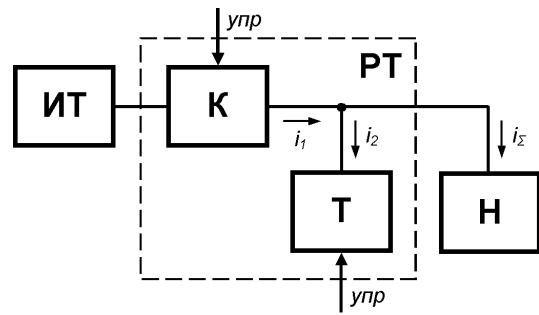


Рис. 4

Использование двух непрерывно управляемых транзисторов, один из которых соединяется параллельно с ключом, а другой параллельно с нагрузкой (рис. 5) позволяет осуществлять регулирование тока как в сторону его увеличения, так и в сторону его уменьшения.

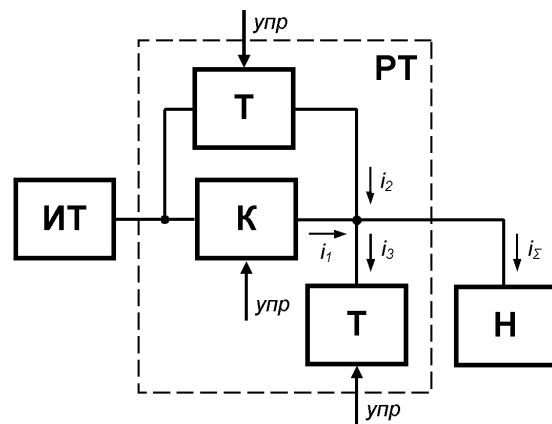


Рис. 5

Алгоритм работы схемы на рис. 5 следующий. При подаче сигнала управления начинает работать ключ, периодически включаясь и передавая в нагрузку ток от источника тока. В промежутки времени, когда необходимо повысить точность регулирования тока, к процессу формирования подключаются непрерывно управляемые транзисторы, увеличивая или уменьшая ток. Таким образом, в нагрузке происходит алгебраическое суммирование токов, обеспечиваемых ключом и одновременно работающими с ним непрерывно управляемыми транзисторами:

$$i_{\Sigma} = i_1 + i_2 - i_3 \quad (2)$$

Другой способ построения регулятора тока с комбинированным управлением заключается в том, что один и тот же силовой транзистор на ответственном этапе формирования импульса работает в активном режиме, а в течение остального времени – в импульсном [5]. Структурная схема, соответствующая этому способу построения регулятора, показана на рис. 6. Поскольку время непрерывного регулирования транзистора составляет некоторую часть всего времени его работы, общие потери мощности на транзисторе за период формирования импульса тока сокращаются.

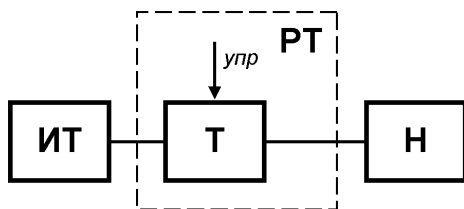


Рис. 6

Новые возможности для эффективного использования комбинированного режима управления появляются при построении регуляторов по модульному принципу, согласно которому в формировании тока (напряжения) участвует некоторое количество параллельно (последовательно) соединенных силовых транзисторов или унифицированных модулей (ячеек). Каждый унифицированный модуль может содержать не только один или несколько силовых транзисторов, защитные и токовыравнивающие элементы, но и элементы управления. В многоячейковых преобразователях любые, сколь угодно большие, токи и напряжения могут быть получены путем объединения некоторого количества идентичных преобразовательных ячеек сравнительно небольшой мощности. При этом достигается улучшение формы напряжения и тока, повышается гибкость перестройки структуры преобразователей, обеспечивается высокая степень унификации, что немаловажно с точки зрения технологичности их конструкции, а также расширяются возможности для повышения надежности их работы путем резервирования ячеек. Модульный принцип широко используется для построения электронных преобразователей различного типа, в том числе многоуровневых инверторов [6-9], выпрямителей [10], импульсных преобразователей постоянного напряжения [8, 9] и др.

Известен способ построения многоячейкового регулятора тока для контактной сварки, состоящего из  $n$  идентичных ячеек, соединенных между собой параллельно как по входу, так и по выходу, каждая из которых стабилизирует ток на заданном уровне [11]. Структурная схема, соответствующая данному способу построения регулятора, показана на рис. 7, где ИТ – источник тока, РТ – регулятор тока,  $Я_1 \dots Я_n$  – стабилизирующие ток ячейки, СУ – система управления, Н – нагрузка. Алгоритм работы схемы иллюстрирует временная диаграмма на рис. 8. В соответствии с сигналом задания в момент времени  $t_0$  СУ подает сигнал управления на  $Я_1$ , которая обеспечивает протекание в нагрузке Н стабильного тока  $I_{СТ}$ . При увеличении сигнала задания в момент  $t_1$  СУ подключает  $Я_2$ , которая также обеспечивает протекание тока  $I_{СТ}$ . Следовательно, после подключения  $Я_2$  в нагрузку протекает суммарный ток  $i_{\Sigma}$ , значение которого равно  $2I_{СТ}$ . По мере подключения следующих ячеек в моменты времени  $t_2$  и  $t_3$  ток в нагрузке ступенчато увеличивается на стабильное значение  $I_{СТ}$ . Для уменьшения тока  $i_{\Sigma}$  производится последовательное отключение ячеек. Регулирование скорости нарастания и спада импульса тока  $i_{\Sigma}$  осуществляется изменением временных интервалов между подключениями и, соответственно, отключениями ячеек.

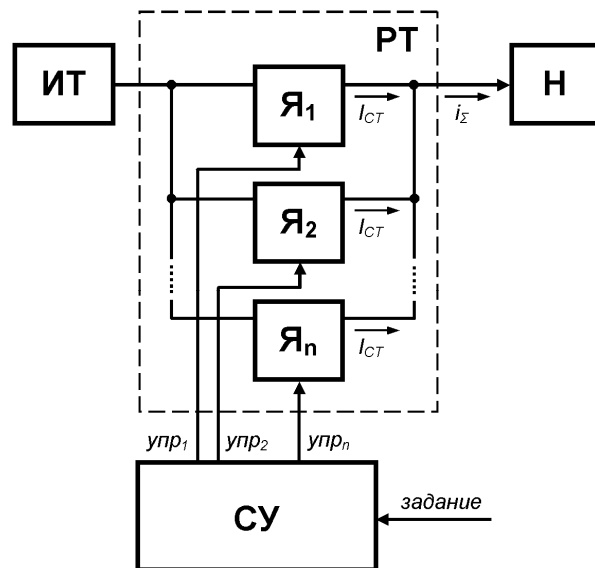


Рис. 7

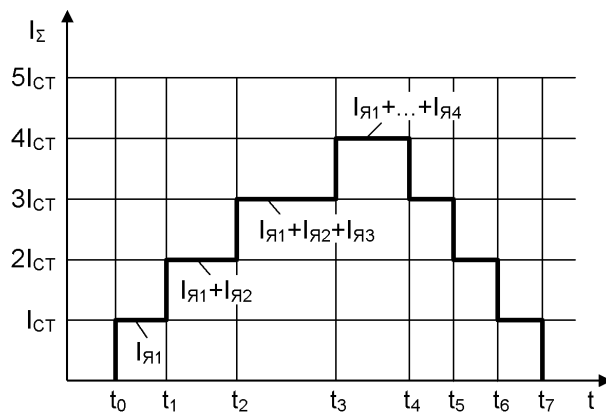


Рис. 8

Недостатком описанного способа построения регулятора можно считать ступенчатую аппроксимацию импульса тока, которая не может обеспечить высокой точности задания формы импульса.

Известен также способ построения многоячейкового регулятора с комбинированным управлением формирователя выходного напряжения, в котором напряжение формируется параллельно подключенными к источнику питания и последовательно соединенными по выходу  $n$  идентичными нерегулируемыми преобразовательными ячейками и одной регулируемой ячейкой [12, 13]. Структурная схема, соответствующая данному способу построения регулятора, показана на рис. 9, где ИП – источник питания, РН – регулятор напряжения,  $Я_1 \dots Я_n$  – нерегулируемые ячейки,  $Я_{РЕГ}$  – регулируемая ячейка, СУ – система управления, Н – нагрузка. Алгоритм работы схемы иллюстрируют временные диаграммы на рис. 10. В момент времени  $t_0$  СУ подает сигнал управления, определяемый разностью сигнала задания и сигнала обратной связи от датчика в нагрузке, на  $Я_{РЕГ}$ , которая в соответствии с сигналом управления формирует напряжение до момента  $t_1$  достижения им некоторого порогового значения  $U_{ПОР}$ . Момент достижения напряжением на выходе  $Я_{РЕГ}$  порогового

значения отслеживается датчиком, который при этом подает сигнал в СУ, после чего СУ снимает сигнал управления с  $Y_{РЕГ}$  и подключает  $Y_1$ , которая поддерживает достигнутое пороговое значение. Далее процесс повторяется:  $Y_{РЕГ}$ , периодически подключаясь, обеспечивает необходимую форму импульса в пределах одного уровня напряжения, а  $Y_1 \dots Y_n$ , подключаемые последовательно по мере нарастания сигнала задания, обеспечивают ступенчатое нарастание напряжения. При этом текущее напряжение на нагрузке является суммой напряжений всех работающих нерегулируемых ячеек и напряжения, формируемого регулируемой ячейкой.

Недостатком описанного способа построения регулятора можно считать неполную унификацию ячеек, из которых только одна ячейка является регулируемой, а остальные – нерегулируемыми.

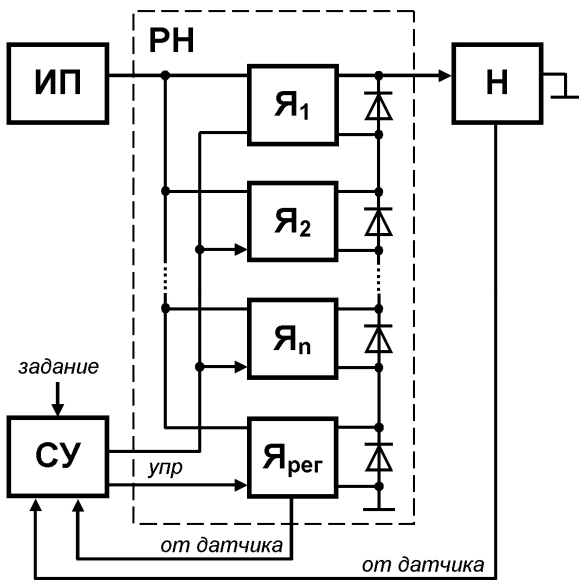


Рис. 9

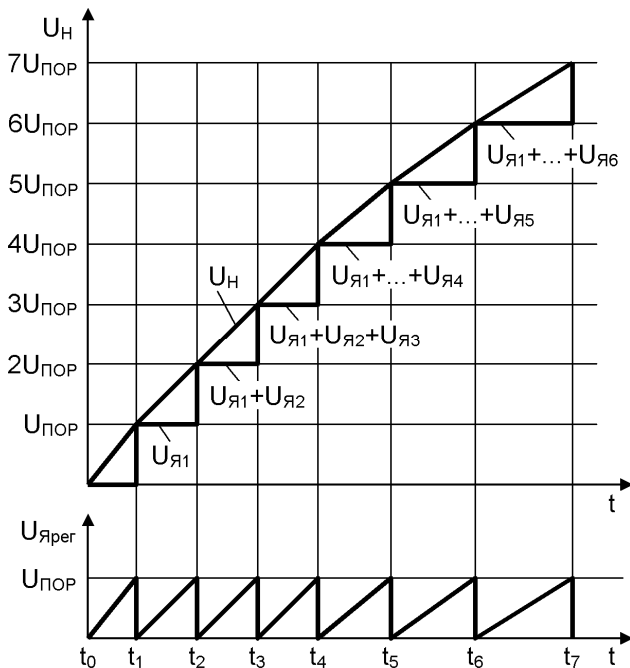


Рис. 10

С целью уменьшения общего количества ячеек регулятора они могут проектироваться на различные уровни выходного напряжения. Так, известен способ построения многоячейкового регулятора напряжения с комбинированным управлением, при котором на выходе регулируемой ячейки может устанавливаться значение напряжения в пределах от 0 до некоторого порогового уровня  $U_{ПОР}$ , а выходные напряжения нерегулируемых ячеек пропорциональны коэффициентам двоичного кода:  $1U_{ПОР}$ ,  $2U_{ПОР}$ ,  $4U_{ПОР}$ ,  $8U_{ПОР}$ ,  $16U_{ПОР}$  и т.д. [13]. Структура данного регулятора подобна структуре, показанной на рис. 9. Для ступенчатого увеличения суммарного напряжения в нагрузке регулятора нерегулируемые ячейки подключаются не последовательно, а в таких сочетаниях, чтобы обеспечить приращение напряжения на один пороговый уровень:  $1U_{ПОР}$ ,  $2U_{ПОР}$ ,  $1U_{ПОР}+2U_{ПОР}$ ,  $4U_{ПОР}$ ,  $1U_{ПОР}+4U_{ПОР}$ ,  $2U_{ПОР}+4U_{ПОР}$ ,  $1U_{ПОР}+2U_{ПОР}+4U_{ПОР}$ ,  $8U_{ПОР}$  и т.д. Текущее значение напряжения на нагрузке так же, как и в предыдущем случае, является суммой напряжений всех работающих нерегулируемых ячеек и напряжения, формируемого регулируемой ячейкой.

Данный способ регулирования напряжения применен авторами [14] при построении многоячейкового преобразователя частоты.

Недостатком описанного способа построения регулятора можно считать уникальность реализации каждой его ячейки, что не позволяет достичь высокой степени унификации конструкции регулятора.

Указанного недостатка лишен способ построения многоячейкового регулятора напряжения формирователя импульсов, при котором все ячейки регулятора идентичны и являются регулируемыми [15]. Структура данного регулятора подобна структуре, показанной на рис. 9. Формирователь предназначен для генерирования импульсов тока с плоской вершиной, уровень которой должен поддерживаться с высокой точностью (рис.11).

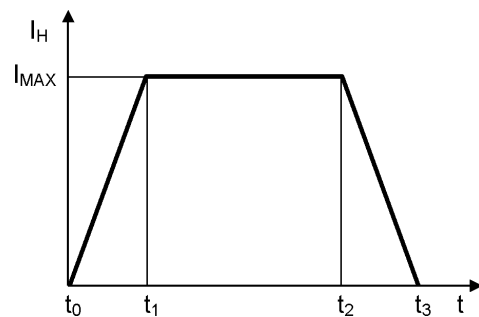


Рис. 11

Алгоритм работы регулятора следующий. В момент времени  $t_0$  для обеспечения быстрого нарастания тока в нагрузке СУ подключает к ней одновременно все ячейки, которые при этом выдают максимальные напряжения. На интервале времени  $t_0 - t_1$  ток в нагрузке, обеспечиваемый суммой напряжений на выходах всех ячеек, постепенно нарастает и в момент  $t_1$  достигает уровня  $I_{МАХ}$ . С момента  $t_1$  на протяжении интервала времени  $t_1 - t_2$  ток поддерживается на постоянном уровне  $I_{МАХ}$ , для чего  $m$  ячеек из общего

количества  $n$  продолжают выдавать максимальные напряжения, одна ячейка переходит в режим непрерывного регулирования, а остальные – отключаются. Количество ячеек  $m$ , которые должны выдавать максимальные напряжения для поддержания необходимого уровня тока, определяется по формуле:

$$m = \frac{I_{MAX} \cdot R_H}{U_{ИП}}, \quad (3)$$

где  $R_H$  – сопротивление нагрузки,  
 $U_{ИП}$  – напряжение источника питания.

Ячейка, которая находится в режиме непрерывного регулирования, с целью повышения точности поддержания уровня тока в нагрузке осуществляет коррекцию суммарного значения напряжения всех работающих ячеек, уменьшая или увеличивая напряжение на своем выходе в пределах одного уровня регулирования (от 0 до максимального напряжения ячейки). Если для компенсации отклонения тока в нагрузке от требуемого значения недостаточно приращения напряжения в пределах одного уровня регулирования, происходит переключение данной ячейки в режим выдачи максимального напряжения, а также подключение и переход в режим непрерывного регулирования следующей по номеру ячейки или отключение данной ячейки и переход в режим непрерывного регулирования предыдущей.

Последний способ построения регулятора предусматривает полную унификацию ячеек в структуре регулятора, комбинированное регулирование ячеек, позволяющее получить высокий КПД схемы, а также возможность формирования импульса произвольной формы с необходимой точностью. Указанные преимущества данного способа построения регулятора позволяют выделить его из ряда других описанных способов и принять в качестве прототипа для построения регулятора сварочного тока формирователя импульсов для контактной микросварки.

#### МНОГОЯЧЕЙКОВЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ТОКА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ УСТАНОВОК КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

Регулятор сварочного тока для установки контактной микросварки предлагается построить на  $n$  параллельно соединенных по входу и по выходу идентичных регулируемых транзисторных ячейках ( $Я_1$  –  $Я_n$ ), количество которых будет определяться максимальной мощностью сварочного импульса. Использование параллельного способа соединения ячеек по выходу, который подразумевает суммирование выходных токов ячеек, а не напряжений, в данном случае является более предпочтительным, поскольку падение напряжения на низкоомной нагрузке регулятора – сварочном контакте – невелико и разбиение его на отдельные уровни представляет определенную сложность.

Структурная схема разрабатываемого регулятора сварочного тока в составе формирователя импульсов установки для контактной микросварки, показана на рис. 12, где ФИ – формирователь импульсов, ИСТ – источник сварочного тока, РСТ – регулятор сварочно-

го тока,  $Я_1 \dots Я_n$  – транзисторные ячейки регулятора, СУ – система управления регулятором сварочного тока, Н – нагрузка (сварочный контакт).

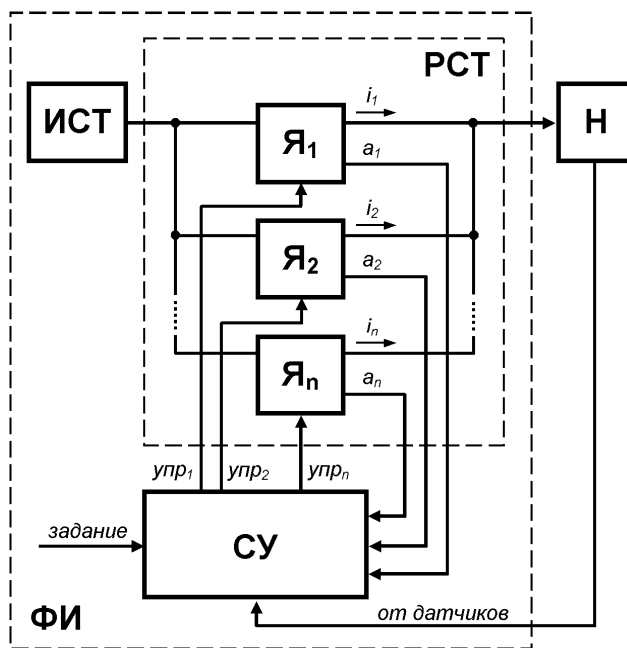


Рис. 12

Транзистор каждой ячейки в процессе формирования сварочного импульса может находиться в одном из трех режимов работы: в насыщении, отсечке или активном режиме. Для упрощения формулировок далее будем называть состояния ячейки, при которых ее транзистор находится в режимах насыщения, отсечки или активном режиме, соответственно, насыщением ячейки, отсечкой ячейки и активным состоянием ячейки.

Алгоритм работы регулятора сварочного тока может быть описан следующим образом. После сигнала о начале сварки система управления СУ подключает к нагрузке только одну ячейку  $Я_1$ , которая при этом находится в активном состоянии. В процессе формирования мощности сварочного импульса по заданному закону (1) СУ принимает от датчиков, установленных в нагрузке, сигнал о текущем фактическом значении мощности и выдает сигнал управления в соответствии со значением рассогласования сигнала от датчиков и сигнала задания на ячейку, находящуюся в активном состоянии. При этом выходной ток  $Я_1$  увеличивается или уменьшается в пределах от 0 до тока насыщения силового транзистора ячейки  $I_{НАС}$ . При достижении током  $Я_1$  уровня  $I_{НАС}$ ,  $Я_1$  переходит в состояние насыщения. СУ принимает сигнал о состоянии  $Я_1$  (на рис. 12 обозначен как  $a_1$ ) и, продолжая поддерживать  $Я_1$  в состоянии насыщения, подключает к процессу формирования импульса ячейку  $Я_2$ , которая до момента достижения ее током уровня  $I_{НАС}$  также находится в активном состоянии, а затем переходит в насыщение. Таким же образом подключаются следующие ячейки. При этом все работающие ячейки обеспечивают необходимую суммарную мощность в нагрузке.

Согласно описанному алгоритму, каждая ячейка регулятора по мере нарастания сигнала задания мощ-

ности находится сначала в состоянии отсечки, затем в активном состоянии и, наконец, в состоянии насыщения. Приближенный к текущему значению задания уровень мощности обеспечивают ячейки, находящиеся в состоянии насыщения, а дорегулирование значения мощности для получения необходимой точности формирования импульса осуществляет ячейка, находящаяся в данный момент в активном состоянии.

При построении многоячеековых преобразователей различного назначения с целью повышения надежности их функционирования широко применяется резервирование ячеек. Резервирование заключается во введении некоторого избыточного количества ячеек в структуру преобразователя, которое обеспечивает бесперебойную работу схемы в случае выхода из строя одной или нескольких ячеек.

Повысить надежность функционирования регулятора предложенной структуры с описанным алгоритмом работы можно путем так называемого «холодного» резервирования, при котором основной набор транзисторных ячеек постоянно находится в работе, а ячейки из другого, резервного, набора используются только при выходе из строя одной или нескольких ячеек основного набора. Применение «горячего» резервирования, при котором все ячейки одновременно находятся в работе, но задействуются не на полную мощность, в данном случае является нерациональным, поскольку такой способ резервирования не предусматривает переход ячеек в насыщенное состояние и, соответственно, не позволяет использовать комбинированный режим работы ячеек.

Реализация резервирования ячеек неизбежно приведет к ухудшению массогабаритных показателей регулятора и, очевидно, к усложнению алгоритма его работы, однако значительное повышение надежности его функционирования без сомнения оправдывает указанные недостатки при организации технологического процесса сваривания деталей устройств ответственного назначения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение транзисторного регулятора сварочного тока для установок контактной микросварки в виде многоячеековой структуры в сочетании с использованием комбинированного режима работы ячеек, при котором одна ячейка работает в активном режиме, а остальные – в ключевом, позволит получить значительный эффект с точки зрения обеспечения высоких энергетических характеристик, точности формирования сварочного импульса и надежности работы регулятора, а также позволит унифицировать его конструкцию.

[1] Паэранд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. Особенности формирования импульсов тока для сварки малогабаритных деталей // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск, ч. 3, 2005 г., стр. 28-31.

[2] Паэранд Ю.Э., Бондаренко Ю.В., Бондаренко А.Ф. Формирователи импульсов тока для контактной сварки // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2008. – № 3. – С. 25-30.

[3] А.с. 492362 СССР, МПК В23К11/24. Способ регулирования тока в сварочной машине / Зайцев М.П., Блинов И.М. – № 2018065/25-27; заявл. 22.04.1974; опубл. 25.11.1975, Бюл. № 43. – 4 с., ил.

[4] Гончаров А.Ю. Регуляторы мощности на основе взаимодействия усилителей импульсного и непрерывного режимов // *Электронная техника в автоматике*. Сб. статей, вып. 11, 1980 г., стр. 201-206.

[5] А.с. 479590 СССР, МПК В23К11/24. Способ управления сварочным током / Зайцев М.П., Блинов И.М. – № 2018064/25-27; заявл. 22.04.1974; опубл. 05.08.1975, Бюл. № 29. – 2 с., ил.

[6] Зиновьев Г.С., Зотов Л.Г., Темлякова З.С. Пути эволюции многоуровневых инверторов напряжения // *Технічна електродинаміка*. Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 6, 2008 р., с. 58-69.

[7] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Multilevel Power Converters," *Power Electronics Handbook*, 2nd Edition Elsevier, 2007, Chapter 17, pp. 451-482.

[8] Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.

[9] Высоочастотные транзисторные преобразователи / Э.М. Ромаш, Ю.И. Драбович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

[10] А.с. 744933 СССР, МПК Н03К3/53. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии / Панфилов Д.И., Иванов В.С., Сирик В.Н. – № 2593733/18-21; заявл. 23.03.1978; опубл. 30.06.1980, Бюл. № 24. – 4 с., ил.

[11] Патент 2236333С1 Российская Федерация, МПК В23К11/24. Способ контактной сварки и источник питания для его реализации / Булычев В.И., Бычихин Н.А., Зарубин М.Г., Киселев А.С., Краснощекоев Д.П., Лавренюк П.И., Нехода М.М., Пименов Ю.В., Поляков С.А., Рожков В.В., Советченко Б.Ф., Струков А.В., Чапаев И.Г., Эльман В.О., Юрин П.М. Патентообладатель Томский политехнический университет, ОАО «Новосибирский завод химконцентратов». – № 2003103870/02; заявл. 10.02.2003; опубл. 20.09.2004. – 3 с., ил.

[12] А.с. 1691933А1 СССР, МПК Н03К3/53. Устройство для формирования выходного напряжения / Кодекин В.С., Дягилев В.И., Мальцев И.Г., Седых В.М. – № 4655431/21; заявл. 03.01.1989; опубл. 15.11.1991, Бюл. № 42. – 3 с., ил.

[13] Кодекин В.С., Дягилев В.И., Седых В.М., Мальцев И.Г. Способ формирования выходного напряжения генератора импульсов заданной формы и устройство для его реализации // *Электронная преобразовательная техника*. Вып. 1. Вузовский сборник, 1995 г., с. 52-59.

[14] Патент 2331151С1 Российская Федерация, МПК Н02М7/493. Способ регулирования выходного напряжения многоячеекового преобразователя частоты / Земан С.К., Осипов А.В. Патентообладатель ООО «Магнит». – № 2007111443/09; заявл. 28.03.2007; опубл. 10.08.2008. – 8 с., ил.

[15] Бизянов Е.Е. Источники импульсного питания электрофизических и электротехнологических установок / Дис. ... канд. техн. наук. – Алчевск, ДГМИ. – 1996.