

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛОМ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК КАБЕЛЯ

*А.Г. Михеев*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 224

*Для кабельных изделий наиболее разработана технология сварки тонкостенных металлических оболочек с помощью высокочастотных сварочных станков. Однако для этих же целей могут быть использованы и станы аргонодуговой сварки (АДС). Их нормальное функционирование не мыслится без наличия специальных систем управления, обеспечивающих стабилизацию работы узла сварки. Именно разработке алгоритма управления работой подобного узла и посвящены материалы данной статьи.*

**Ключевые слова:** сварка, оболочка кабеля, алгоритмы управления, инвариантность, структура регулятора, реализация.

Если рассматривать сварочный узел стана АДС как объект управления, то его математическую модель удобно представить в виде двух звеньев, моделирующих процессы, протекающие при формировании сварного шва оболочки. Первое звено с передаточной функцией  $W_{з.с.}$  характеризует зону сварки непосредственно под электродами, а второе звено учитывает процессы, протекающие в момент затвердевания и кристаллизации сварочной ванны. Общий характер ведения процесса сварки оценивается по состоянию вектора выходного качества зоны сварки на выходе из этой активной зоны. Обоснование размерностей данного вектора аналитическими методами представляет собой довольно сложную задачу, поэтому для этой цели были использованы статистические методы априорного ранжирования отдельных показателей качества по их уровню значимости. Это позволило сделать вывод, что нормальное протекание технологических процессов сварки определяется температурой активной зоны сварки или непосредственно самого сварного шва на некотором расстоянии от этой активной зоны. Это позволяет свести вектор качества шва к одному показателю, т. е. к величине температуры зоны сварки. Стабилизацию этой температуры, независимо от уровня и количества действующих возмущений, примем за основу управления ходом сварки оболочек кабеля.

Как показало математическое описание этого процесса сварки, в качестве косвенного алгоритма стабилизации температуры используют соотношение

$$\frac{P}{V} = C = Const, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность или энергия, вводимые в активную зону сварки;  $V$  – скорость ведения сварочного процесса, т. е. скорость сварки.

Приведенное соотношение (1) представляет собой удельную мощность, отбираемую от источника питания дуги стана АДС. Стабилизацию этой удельной мощности и будем рассматривать как задачу стабилизации температуры активной зоны сварки. Практическое решение приведенной задачи потребует наличия возможности управления мощностью источника рабочей дуги стана.

Принципиально в качестве регулирующего воздействия по алгоритму (1) допус-

тимо использовать и изменение скорости работы сварочного стана, но это воздействие дает значительное запаздывание и, кроме того, будет являться дополнительным возмущением для контура управления приводом этого стана. Поэтому целесообразно остановиться на управлении температурой зоны сварки за счет изменения мощности отбираемой от источника питания дуги. Для получения высокого быстродействия при таком способе управления процессом сварки оболочки потребуются наличие практически безынерционных управляемых источников постоянного тока. Таким требованиям наиболее полно отвечает тиристорный управляемый преобразователь. Рассмотрим теперь возможность контроля за основной выходной величиной объекта, т. е. за температурой зоны сварки. Непосредственный контроль за ее величиной в самой активной зоне практически невозможен, поэтому реально контролируется температура сварного шва на некотором расстоянии от дуги. По данным литературных источников, для такого частного случая можно использовать фотоэлектрические датчики температуры типа ФЭП-4М или аналогичные датчики, входящие в комплект регуляторов АРТ-2М-ВВ высокочастотных станков. Погрешность указанных датчиков не превышает 1,5 %, а динамические свойства соответствуют апериодическому звену первого порядка с постоянной времени  $T = 0,005$  сек.

Таким образом, определив возможный вариант структуры неизменяемой части системы, можно приступить к синтезу для нее возможных вариантов структурных схем, реализующих основной алгоритм управления (1). С этой целью представим этот исходный алгоритм (1) в следующем виде:

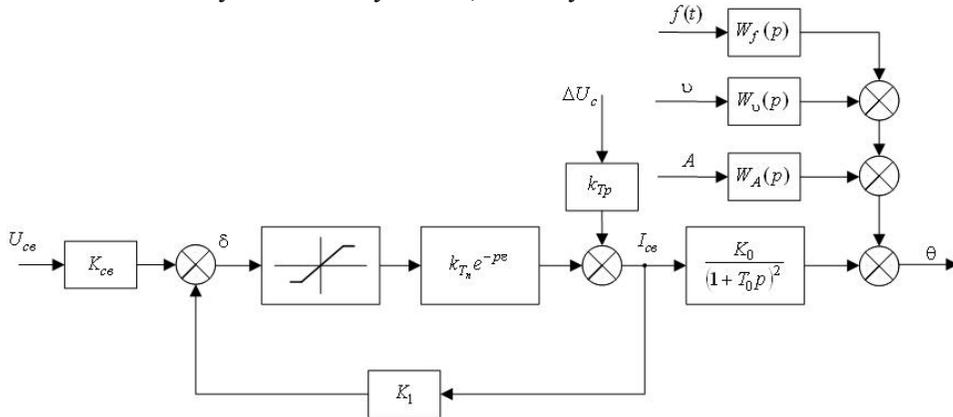
$$P_{св} = CV_{св} . \quad (2)$$

Данное уравнение наглядно показывает, что техническая реализация поставленной задачи легко осуществляется простой следящей системой, в которой мощность, вводимая в активную зону сварки, следит за скоростью сварки. Очевидно, что вместо мощности можно с успехом обеспечивать слежение за сигналом, пропорциональным скорости работы стана тока сварки. Структурная схема такой следящей системы достаточно проста, но несмотря на наличие в ней замкнутого контура данный вариант структуры системы управления представляет собой систему управления по возмущению. То есть по отношению к объекту управления она в состоянии компенсировать только одно основное возмущение со стороны скорости сварки. Причем точность компенсации этого возмущения существенно зависит от структуры внутреннего контура, состоящего из ТУВ и датчика выходной мощности этого источника или тока сварки. В любом случае датчик представляет собой безынерционное звено с коэффициентом передачи ( $K_d$ ). По своим динамическим свойствам тиристорный источник обычно представляется звеном транспортного запаздывания и нелинейным статистическим звеном с зоной насыщения. Полученная при этом структурная схема, реализующая алгоритм (2), представлена на рис. 1.

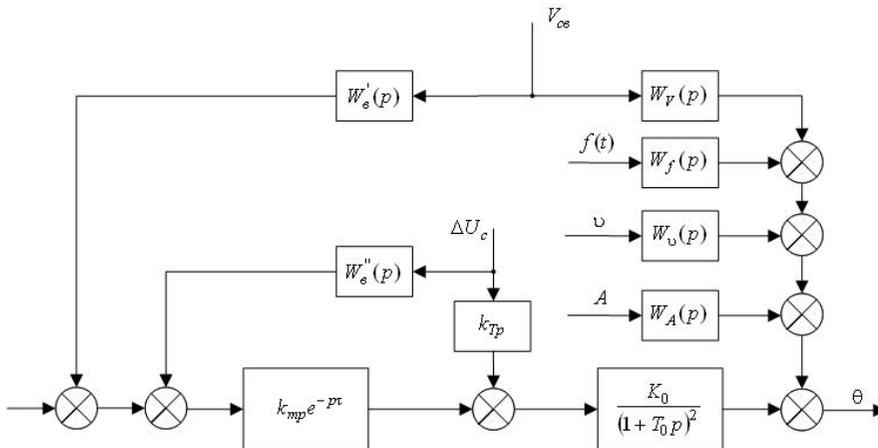
Анализ устойчивости полученного контура следящей системы с помощью частотного критерия устойчивости показывает, что он будет устойчив, если  $K_{III} K_1 < 1$ , а это, в свою очередь, означает, что погрешность приведенного варианта системы будет не менее 50%, что явно недопустимо.

Следовательно, схема, показанная на рис. 1, не в состоянии обеспечить необходимое качество управления. При желании точность отработки сигнала от датчика скорости может быть повышена за счет увеличения  $K_{pc}$ , но это потребует ввода во внутренний контур корректирующего инерционного звена, что существенно ухудшит динамику этого контура. Следовательно, это направление не дает эффективного решения поставленной задачи. Поэтому более предпочтительно рассмотреть воз-

возможность управления процессом сварки, используя принцип системы компенсации основных действующих возмущений, действующих в ее зоне.



Р и с. 1. Структурная схема реализации косвенного алгоритма стабилизации температуры зоны сварки



Р и с. 2. САУ процессом АДС кабельной оболочки, реализующей управление по возмущению

Структурная схема такой системы показана на рис. 2. Техническая реализация подобной структуры вполне возможна, т. к. для контроля основных возмущений ( $\Delta V_{cb}, \Delta U_c$ ) имеются практически безынерционные датчики. Остается определить структуру регуляторов по возмущению  $W'_B(p)$  и  $W''_B(p)$ . С этой целью определим реакцию выходной величины на основное возмущение и положим их равными нулю, т. е. запишем условие инвариантности предложенной системы по отношению к возмущениям. В результате получим:

$$\Delta\theta_1 = V_{cb}(p)[W_{об}(p) - W'_B(p)W_{ти}(p)W_{об}(p)] = 0, \quad (3)$$

$$\Delta\theta_2 = \Delta V_c(p)[K_{TP}W_{об}(p) - W''_B(p)W_{ти}(p)W_{об}(p)] = 0, \quad (4)$$

где  $W_{об}(p)$  – передаточная функция объекта по управляющему воздействию, а  $W_{об}(p)$  – соответственно по возмущению со стороны скорости сварки. Между на-



$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{W_y}{1 + W_y W_{\text{oc}}} = \frac{W_y}{1 + W_y k_{\text{oc}} e^{-p\tau}} \quad (7)$$

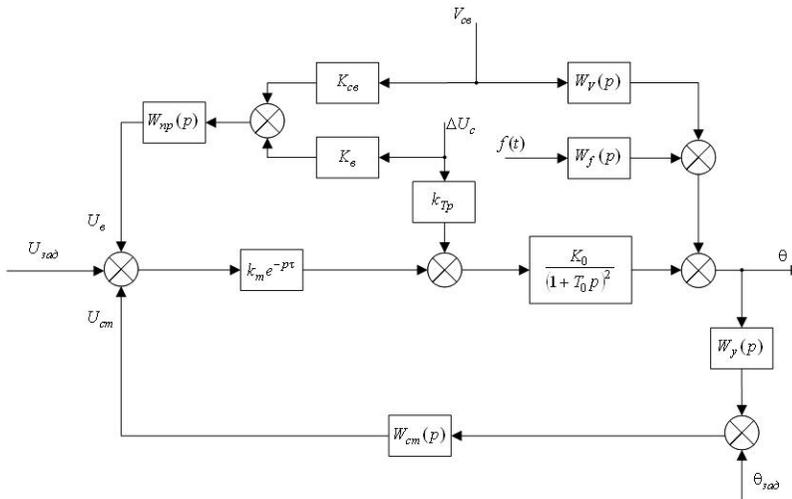
Если в таком устройстве использовать единичную обратную связь и выбрать усилитель, который обеспечит выполнение неравенства

$$W_y W_{\text{oc}} \gg 1, \quad (8)$$

то передаточная функция замкнутого контура примет вид

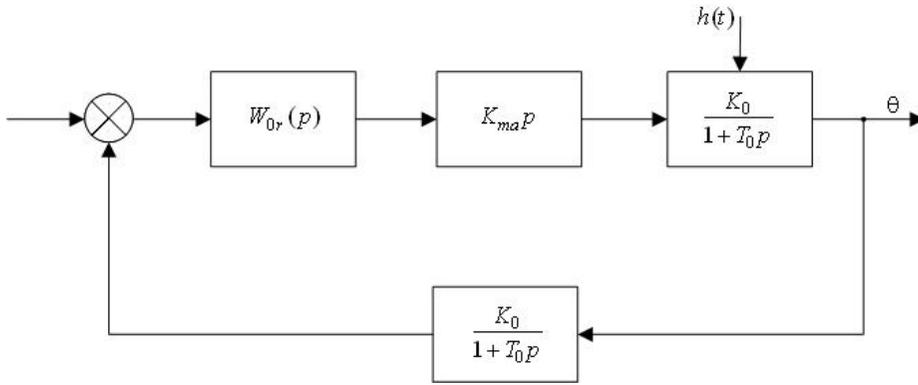
$$W_{\text{пр}}(p) \frac{1}{e^{-p\tau}} = e^{p\tau} \quad (9)$$

Таким образом, глубина неравенства (8) практически определяет степень инвариантности полученной системы управления по отношению к действующим возмущениям в динамическом режиме. Более просто реализуются условия инвариантности для статического режима, так как требуется только настройка коэффициентов передачи. Это легко осуществить непосредственно на работающем стане. В то же время следует заметить, что даже идеальная реализация условий инвариантности устраняет только два основных возмущения со стороны скорости сварки и колебаний напряжения питания. Все же остальные неучтенные возмущения по-прежнему будут давать ошибку управления. Для коррекции таких неучтенных возмущений целесообразно ввести контур управления по отклонению, т. е. перейти к комбинированному управлению. Структура такой системы показана на рис. 4. Учитывая высокие требования к качеству шва сварной оболочки, можно сказать, что такое усложнение структуры вполне оправданно. Управление по отклонению осуществит коррекцию всех динамических и статических ошибок независимо от причин, вызывающих их появление. То есть оно тем самым обеспечит высокую точность стабилизации температуры на выходе из активной зоны сварки.



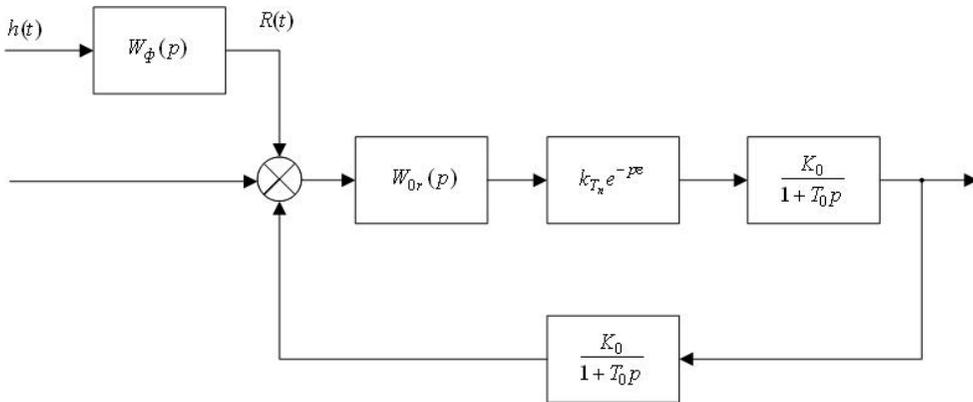
Р и с. 4. Структурная схема комбинированной САУ процессом ввода энергии в активную зону сварки

Введение контура управления по отклонению автоматически ставит задачу синтеза его структуры. С этой целью рассмотрим контур управления по отклонению как самостоятельную систему. Его структурная схема представлена на рис. 5.



Р и с. 5. Структурная схема контура стабилизации температуры

Возмущение  $h(t)$  со входа объекта управления можно привести ко входу системы в виде некоторой случайной эквивалентной помехи  $R(t)$ , которая действует вместе с входными сигналами замкнутого контура. Результирующая приведенная структурная схема для этого случая принимает вид, показанный на рис. 6.



Р и с. 6. Эквивалентная структура контура стабилизации температуры активной зоны сварки

Сопоставляя ее с исходной (рис. 5), можно из условия эквивалентности данных структур определить вид передаточной функции фильтра:

$$W_{\phi}(p) = \frac{W_{об}(p)}{W_{об}(p)} \cdot \frac{1}{W_{от}(p)W_{ти}(p)}, \quad (10)$$

где  $W_{об}(p)$  – передаточная функция объекта по возмущению.

Если считать возмущение  $f(t)$  приведенным ко входу объекта, то выражение (10) примет вид

$$W_{\phi}(p) = \frac{e^{p\tau}}{W_{от}(p)k_{ти}}. \quad (11)$$

С точки зрения идеальной системы регулирования температуры необходимо, чтобы она обладала абсолютными фильтрующими свойствами по отношению к рас-

смагриваемому возмущению, т. е.  $W_{\phi}(j\omega) = 0$ . В реальных условиях такое свойство стремятся обеспечить хотя бы в области наиболее опасных низких частот. Если выражение для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) эквивалентного фильтра разложить в ряд Тейлора при значениях частот  $\omega = 0$ , то условие фильтрации низких частот представится следующими выражениями:

$$\begin{aligned} W_{\phi}(\omega)\Big|_{\omega=0} &= 0; \\ \frac{W_{\phi}(j\omega)}{\partial\omega}\Big|_{\omega=0} &= 0; \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \tag{12}$$

Полученное условие (12) можно теперь использовать для выбора наиболее рациональной структуры регулятора по отклонению. С этой целью рассмотрим структуру и общее выражение для амплитудно-фазовой характеристики нашего фильтра:

$$W_{\phi}(j\omega) = \frac{1}{W_{от}(j\omega)} \cdot \frac{e^{j\omega\tau}}{k_{ти}} = W_{\phi}^*(j\omega) \cdot \frac{e^{j\omega\tau}}{k_{ти}}.$$

Нетрудно заметить, что тиристорный источник оказывает равномерное влияние на весь диапазон передаваемых частот, ослабляя их в  $k_{ти}$  раз. Поэтому полное подавление тех или иных частот возможно только за счет регулятора. Ориентировочно количественную оценку частотного спектра помехи  $f(t)$ , приведенной ко входу системы, можно сделать по частоте среза объекта. В нашем случае этот частотный диапазон будет равен  $\omega_f = \frac{1}{T_0}$ . Следовательно, если для подавления возмущений со

стороны  $h(t)$  использовать простое аperiodическое звено первого порядка  $\frac{k_{\phi}}{1 + T_{\phi}p}$ , то постоянную времени фильтра необходимо выбирать в соответствии с неравенством

$$T_{\phi} > T_0, \tag{13}$$

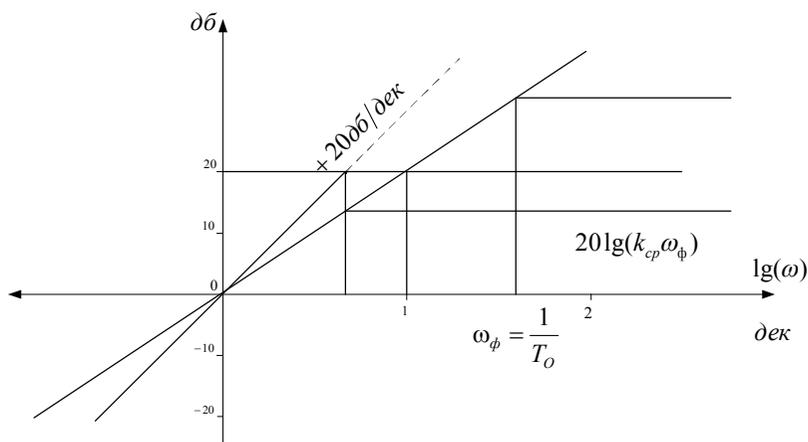
где  $T_0$  – постоянная времени математической модели активной зоны сварки как объекта управления.

Для наглядной оценки свойств этой структуры фильтра рассмотрим его логарифмическую амплитудно-частотную характеристику. Простой анализ этой характеристики показывает, что для устранения подъема в области высоких частот необходимо, чтобы  $\omega_{\delta} \geq \omega_0$ , т. е.  $T_{\phi} > 1$ .

Это обеспечит ослабление всех частот, проходящих через фильтр. Нетрудно заметить, что дополнительное подавление передаваемых частот в фильтре может быть получено при выполнении следующих неравенств:

$$T_{\phi} > 1; \quad 0 < k_{\phi} < T_{\phi}. \tag{14}$$

Приведенная система неравенств включает в себя и первое условие  $T_{\phi} > T_0$  в том случае, если  $0 < T_0 < 1$ , что имеет место для нашего объекта управления, так как  $T_0 = 0,05$  сек.



Р и с. 7. Частотные характеристики для структуры эквивалентного фильтра на входе системы

Таким образом, в дальнейшем достаточно ориентироваться на выполнение условий (14). Это позволит от полученной структуры фильтра перейти к структуре регулятора отклонения по следующему соотношению:

$$W_{от} = \frac{1}{W_{\phi}^*(p)} = \frac{1 + T_{\phi}p}{k_{\phi}p}. \quad (15)$$

Выражение (15) показывает, что структура регулятора соответствует типовому ПИ-закону регулирования:

$$W_{om}(p) = \frac{k_p(1 + T_{и}p)}{T_{и}p},$$

где  $T_{и} = T_{\phi}$ ;  $k_{\phi} = \frac{T_{и}}{k_p}$ .

Тогда рекомендации (14) преобразуются к виду

$$T_{и} > 1, \quad k_p \geq 1, \quad 0 < T_{и}/k_p < T_{и}. \quad (16)$$

Данные рекомендации необходимо учитывать на втором этапе параметрического синтеза рассматриваемого контура стабилизации температуры. Он имеет всего два параметра настройки: коэффициент передачи  $k_p$  и время интегрирования  $T_{и}$ . По широко известным рекомендациям между указанными параметрами должно быть выдержано соотношение  $(k_p/T_{и})$  на максимально возможном уровне, т. е. при минимальной границе неравенства из системы (16).

Для решения задачи параметрического синтеза достаточно воспользоваться простым инженерным методом, основанным на использовании логарифмических частотных характеристик. При этом учтем то обстоятельство, что объект подвержен действию дополнительных параметрических возмущений со стороны скорости сварки. Поэтому при синтезе желаемой ЛАХ предусмотрим, чтобы изменяющиеся параметры объекта управления не в состоянии были нарушать качество переходного процесса. Для решения этой задачи достаточно лишь незначительно увеличить время переходного процесса контура стабилизации температуры. Весь процесс синтеза достаточно прост и ничем не отличается от решения простой инженерной задачи. Он

показал, что время изодрома  $T_{и} = 10$  сек, а дробность системы по скорости  $K = 10$ . Кроме этого для обеспечения желаемого качества переходного процесса, т. е. желаемых запасов устойчивости по модулю и по фазе, в основной контур системы должно быть введено звено коррекции с передаточной функцией вида

$$W_{к.з.}(p) = \frac{1 + T_0 p}{1 + 100 p},$$

где  $T_0$  – максимальное значение постоянной времени объекта управления для всех реально возможных режимов и скоростей сварки. Введенная коррекция несколько ухудшает фильтрацию приведенных возмущений в диапазоне частот от 0,1 рад/сек до  $\omega = 1/T_0$ , но сравнительно невысокий уровень остаточных приведенных возмущений позволяет пренебречь данным обстоятельством и принять полученную структуру за основу при технической реализации.

Следует отметить, что на этапе внедрения системы возможно дополнительное упрощение ее общей структуры, если при разработке других систем управления работой стана удастся снизить уровень возмущений, действующих на активную зону сварки, например, за счет стабилизации скорости работы стана, повышения качества очистки и подрезки кромок оболочки перед ее сваркой и т. д.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1977. – 389 с.
2. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.
3. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 438 с.
4. Теория управления / А.А. Алексеев, Д.Х. Имаев, Н.Н. Кузьмин, В.Б. Яковлев. – С-Пб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 434 с.

*Статья поступила в редакцию 4 октября 2011 г.*

## FEATURES OF WELDING THIN-WALLED SHELLS CABLE NODE MANAGEMENT

**A.G. Mikheev**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*In the research paper there is introduced the synthesis of argon-arc welding process management control system of thin-walled metal cable sheath. There is given the general task arrangement and the algorithms of welding temperature regime stabilization are defined. The recommended control algorithm is brought to technical implementation on the basis of thyristor converter.*

**Keywords:** *welding, cable sheath, control algorithms, invariance, structure of the regulator, implementation.*