

## АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СПОСОБОВ ПУСКА УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ

В. М. РИККОНЕН, Ю. С. МЕЛЬНИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры автоматики и телемеханики)

В настоящее время в промышленности все большее распространение получает способ электроконтактного нагрева деталей, особенно это относится к нагреву движущейся проволоки. Такой способ нагрева имеет ряд преимуществ в сравнении с ранее применяемыми методами, основными из которых является создание непрерывного технологического процесса с более высокими энергетическими и экономическими показателями, возможность автоматизации и совмещения нескольких технологических операций.

Примерами такого нагрева являются: патентирование проволоки и горячее волочение, применяемые на металлообрабатывающих заводах, а также отжиг проволоки после холодного волочения, применяемый на кабельных заводах.

Несмотря на важность теоретического исследования установок электроконтактного нагрева, этому вопросу не уделяется достаточного внимания, а установки строятся на основании опыта и эксперимента.

Для правильного проектирования и эксплуатации подобных установок необходимо в первую очередь вскрыть закономерности электрического нагрева движущейся проволоки, а затем найти алгоритмы для их управления.

Частным случаем для установок является процесс их пуска или разгона, который является переходным процессом из одного состояния в другое установившееся состояние. Этому вопросу и посвящается данная статья — рассмотреть некоторые возможные способы пуска.

Процесс пуска установки электроконтактного нагрева важен потому, что, с одной стороны, в существующих установках не обеспечивается нормальное качество проволоки на достаточно больших концах (до 150 м; получается или недогрев или перегрев), с другой стороны, если будет обеспечен процесс пуска, то установившийся режим также будет качественным.

При исследовании процесса нагрева движущейся проволоки в установившемся режиме [1] получено выражение, связывающее основные параметры установки:

$$U = c \cdot \gamma \cdot \theta_k \sqrt{\frac{v \cdot L \cdot K_1}{\ln \left( 1 + \frac{\theta_k}{\tau_0 + \tau_H} \right)}} \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение на нагреваемом участке проволоки;  
 $c$  — удельная теплоемкость металла проволоки;  
 $\gamma$  — удельный вес проволоки;  
 $\Theta_k$  — конечная на участке температура перегрева проволоки;  
 $v$  — скорость движения проволоки;  
 $L$  — длина нагреваемого участка;

$$K_1 = \frac{1}{c \cdot \gamma \cdot \eta_n (\tau_0 + \tau_n)};$$

$\tau_0 = 235^\circ\text{C}$  — для медной проволоки;

$\tau_n = 20^\circ\text{C}$  — начальное значение температуры проволоки;

$\eta_n$  — удельная электропроводность проволоки при  $\tau = \tau_n$ .

Выражение (1) представляет собой алгоритм функционирования системы автоматического регулирования нагрева движущейся проволоки. Из (1) видно, что для получения неизменной температуры перегрева проволоки необходимо поддерживать постоянным соотношение между скоростью движения проволоки, длиной участка между контактами и напряжением.

Следовательно, для создания установок может быть положено в общем случае три принципа управления: первый — изменение напряжения на нагреваемом участке проволоки в зависимости от скорости ее движения при неизменной длине участка; второй — изменение длины участка нагрева в зависимости от соотношения напряжения и скорости движения проволоки; третий — изменение скорости движения в зависимости от напряжения на участке нагрева при неизменной длине участка. Третий способ управления, напоминающий первый, но отличающийся от него тем, что за регулируемую величину берется скорость, а не напряжение, может не рассматриваться ввиду трудности практической реализации и сомнительной целесообразности.

Поскольку при пуске установки происходит ее разгон, означающий не что иное, как изменение скорости движения проволоки, то хорошо применить первый способ управления.

По первому варианту напряжение на нагреваемом участке проволоки должно изменяться в зависимости от скорости ее движения по закону, определяемому выражением (1), независимо от диаметра проволоки. Если учесть, что в питающей сети напряжение обычно меняется, то необходимо иметь стабилизированный и управляемый источник напряжения.

Система автоматического регулирования, построенная по второму варианту, должна состоять из счетно-решающего устройства с алгоритмом управления, полученного из выражения (1)

$$L = \frac{\ln\left(1 + \frac{\Theta_k}{\tau_0 + \tau_n}\right)}{K_1 \cdot c^2 \cdot \gamma^2 \cdot \Theta_k^2} \cdot \frac{U^2}{v} = K \cdot \frac{U^2}{v} \quad (2)$$

и следящей системы для изменения длины участка в зависимости от выходной величины счетно-решающего устройства.

Достоинством второго варианта регулирования является то, что к источнику питания установки не предъявляется жестких требований, поэтому в качестве такового для питания группы устройств электроконтактного нагрева проволоки можно использовать один мощный нерегулируемый источник напряжения. В этом случае технико-экономические показатели установок будут выше, чем у установок по первому варианту.

Опытные испытания установки электроконтактного нагрева движущейся проволоки, включая и период пуска, построенной по первому

варианту алгоритма автоматического управления, показали, что качество проволоки удовлетворяет требованиям ГОСТа.

Такие же результаты дают испытания системы управления, построенной по второму варианту.

Однако оба рассмотренных способа автоматического регулирования не способны обеспечить нормальный нагрев так называемого «заправочного» участка проволоки, т. е. отрезка проволоки, который в момент пуска установки и включения напряжения находится между токоподводящими контактами. Концы эти достигают большой длины и поэтому их также надо качественно нагревать.

Если неподвижный участок проволоки перед разгоном установки предварительно нагреть до заданной температуры, а затем осуществить пуск установки, то произойдет перегрев «заправочного» конца; если предварительного нагрева не делать, то некоторая часть (передняя) этого участка окажется недогретой.

Согласно литературным данным, в существующих установках электроконтактного нагрева нормальный нагрев «заправочного» конца не получается.

Кроме того, недостаточный нагрев начального участка проволоки при пуске установок электроконтактного нагрева объясняется электрическими и тепловыми переходными процессами в системе источник питания — нагреваемый участок проволоки, а длина недогретой проволоки увеличивается еще больше.

Проблему нормального нагрева проволоки при пуске установок можно решить по-разному, в частности, как предлагают инженеры Ю. Кашин, И. Гельфанд и Г. Кулаченков.

Суть предложения состоит в следующем (рис. 1): перед разгоном нагреваемой проволоки обеспечивается распределение температуры по длине проволоки между токоподводящими контактами такое же, как

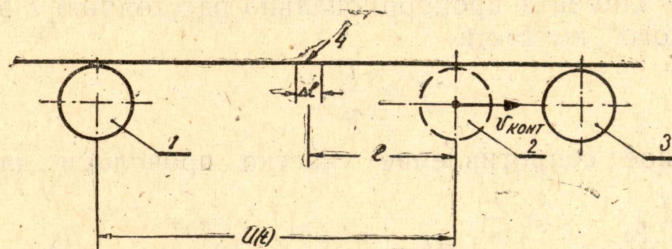


Рис. 1. Участок нагрева проволоки электроконтактной установки: 1 — «горячий» контакт; 2 — «холодный» контакт (в момент передвижения); 3 — «холодный» контакт (рабочее положение); 4 — нагреваемая проволока.

при установившейся скорости. Это достигается передвижением «холодного» контакта (2) с определенной скоростью от «горячего» контакта (1) до рабочего его положения (3). При этом напряжение изменяется таким образом, чтобы сила тока, протекающего по проволоке, оставалась неизменной и соответствовала скорости передвижения «холодного» контакта.

В момент, когда «холодный» контакт займет свое рабочее положение, распределение температуры по длине между контактами будет таким же, как и при установившемся процессе. Нетрудно заметить, что здесь применяется принцип относительности движения: не проволока движется, а движется ролик. Что дальше будет происходить с проволокой, остается неясным.

Авторы предложения не устанавливают, по какому закону должно изменяться напряжение между контактами, как будет совершаться разгон установки и при этом изменяться скорость проволоки. В данной статье проводится анализ предлагаемого способа пуска с тем, чтобы вскрыть его недостатки и получить рекомендации по правильному конструированию подобных устройств. Прежде всего определим необходимый закон изменения напряжения между контактами при передвижении «холодного» контакта.

Закон изменения температуры перегрева элемента проволоки, через который пропускается ток плотностью  $\sigma$ , имеет вид [1]:

$$\Theta = (\tau_0 + \tau_H)(e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot t} - 1) + \Theta_H \cdot e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot t}, \quad (3)$$

где  $\Theta_H$  — начальный перегрев элемента проволоки над окружающей средой (можно принять  $\Theta_H = 0$ ).

Сопротивление элемента проволоки изменяется во времени по закону:

$$R_{\Delta l} = R_{0\Delta l} (1 + \alpha \Theta) = R_{0\Delta l} [1 + \alpha (\tau_0 + \tau_H) \cdot (e^{K_1 \sigma^2 t} - 1)], \quad (4)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления материала;

$R_{0\Delta l}$  — сопротивление элемента проволоки при  $\Theta = 0$ .

Выражение (4) преобразуем с учетом того, что

$$\alpha = \frac{1}{\tau_0 + \tau_H},$$

$$R_{\Delta l} = R_{0\Delta l} \cdot e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot t}. \quad (5)$$

Зависимости (3) — (5) применимы как для случая движения проволоки при неподвижных контактах, так и для случая передвижения «ходного» контакта при неподвижной проволоке.

При постоянной скорости движения проволоки или контакта время нагрева элемента пропорционально расстоянию  $l$  этого элемента от «холодного» контакта

$$t = \frac{l}{v}.$$

Тогда суммарное сопротивление участка проволоки длиной  $l$  равно

$$R_l = \int_0^l \frac{\rho_0}{s} \cdot e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot \frac{l}{v}} \cdot dl = \frac{\rho_0 \cdot v}{s \cdot K_1 \cdot \sigma^2} \cdot (e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot \frac{l}{v}} - 1). \quad (6)$$

Необходимый закон изменения напряжения на участке нагрева при передвижении «холодного» контакта со скоростью  $v$ :

$$U = \sigma \cdot s \cdot R = \frac{v \cdot \rho_0}{K_1 \cdot \sigma} \cdot (e^{K_1 \cdot \sigma^2 \cdot \frac{l}{v}} - 1). \quad (7)$$

Выражение для плотности тока [1]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{v}{L \cdot K_1} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Theta_K}{\tau_0 + \tau_H} \right)}. \quad (8)$$

Подставив значение  $\sigma = \text{const}$  в (7), получим

$$U = \frac{v \cdot \rho_0}{K_1 \cdot \sqrt{\frac{v}{L \cdot K_1} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Theta_K}{\tau_0 + \tau_H} \right)}} \cdot \left[ e^{\frac{l}{L} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Theta_K}{\tau_0 + \tau_H} \right)} - 1 \right]. \quad (9)$$

Это выражение представляет взаимосвязь между напряжением, скоростью передвижения „холодного“ контакта, расстоянием между контактами  $l$  и температурой конечного перегрева проволоки [на участке].

При расчете кривых  $U = f(l)$  (рис. 2) приняты исходные данные для случая рекристаллизационного отжига медной проволоки [1]:

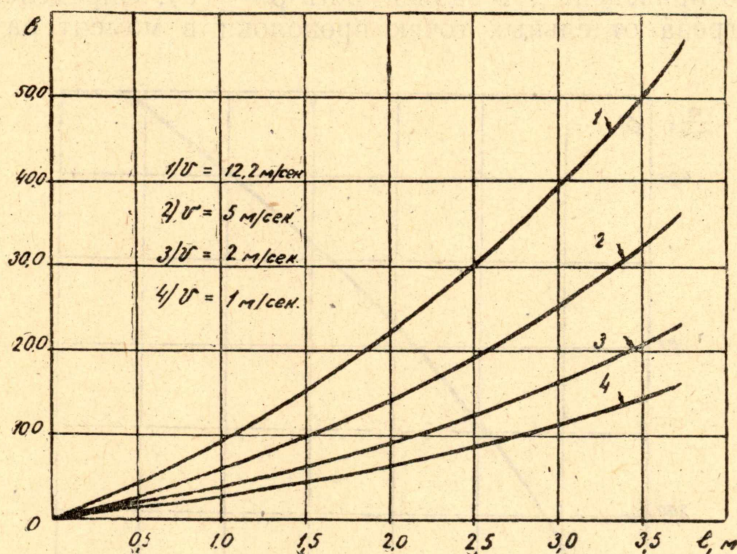


Рис. 2. Зависимости напряжения на нагреваемом участке проволоки от расстояния между контактами для различных скоростей передвижения «холодного» контакта.

$$\Theta_k = 580^\circ\text{C}; \quad L = 3,76 \text{ м}; \quad K_1 = 1,97 \cdot 10^{-5};$$

$$\rho_0 = \frac{1}{56} \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}; \quad (\tau_0 + \tau_n) = 255^\circ\text{C}.$$

Скорость варьировалась от 12,2 м/сек до 1,0 м/сек. В этих расчетах теплоотдачей мы пренебрегали.

Из рис. 2 видно, что чем меньше скорость, тем прямее зависимость напряжения от длины. Если передвигать подвижной контакт очень медленно, то можно подобрать установившийся тепловой режим, который будет зависеть в основном от теплоотдачи проволоки при ее неподвижном состоянии. Когда ролик займет свое рабочее положение, то можно производить пуск установки с нулевой скорости. Дальнейшее управление должно производиться по первому принципу управления, т. е. изменением напряжения в зависимости от скорости.

Если же ролик будет двигаться достаточно быстро, то напряжение надо изменять в соответствии с выражением (9). При достижении роликом рабочего положения (3) должно быть так, чтобы проволока к этому моменту, т. е. почти мгновенно получила скорость движущегося ролика, когда ролик остановится. Дальнейшее управление должно опять производиться напряжением в функции скорости.

Необходимо проверить, обеспечивается ли постоянство температуры конечного участка проволоки, которая является основным показателем качества процесса, при разгоне электроконтактной установки и изменении напряжения на нагреваемом участке по выражению (1).

Поскольку температура перегрева  $\Theta$  связана с плотностью тока зависимостью (3), то можно определить требуемый закон изменения плот-

ности тока на участке нагрева при разгоне проволоки для обеспечения постоянства  $\Theta_k$ .

Следовательно, приняв при разгоне неизменным распределение температуры нагрева при длине участка, что означает также постоянство общего активного сопротивления при изменении напряжения по выражению (1), плотность тока должна выдерживаться в зависимости от скорости по выражению (8).

На рис. 3 приведена эта зависимость  $\delta = f(v)$ . Определение температуры перегрева отдельных точек проволоки в момент разгона про-

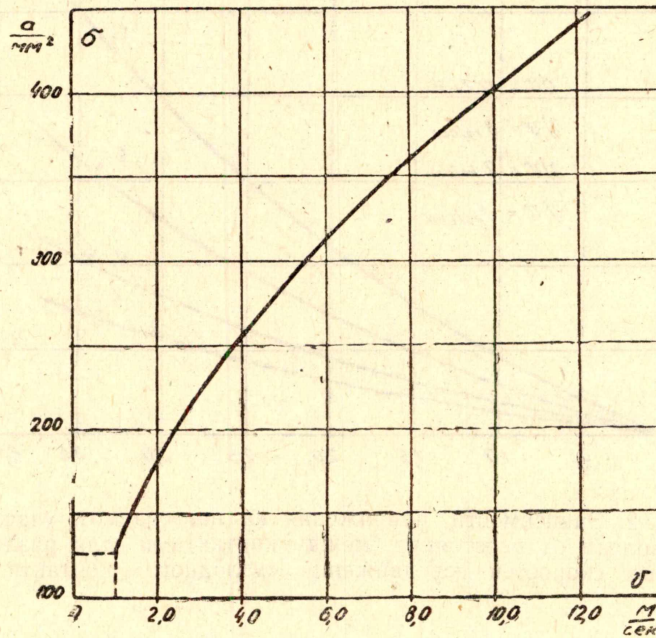


Рис. 3. Зависимость плотности тока нагрева от скорости движения проволоки.

изведено методом математического моделирования на аналоговой вычислительной машине МНБ-1.

На рис. 4 приведена структурная схема модели нагреваемого участка. Методика составления подобной структурной схемы модели и на-

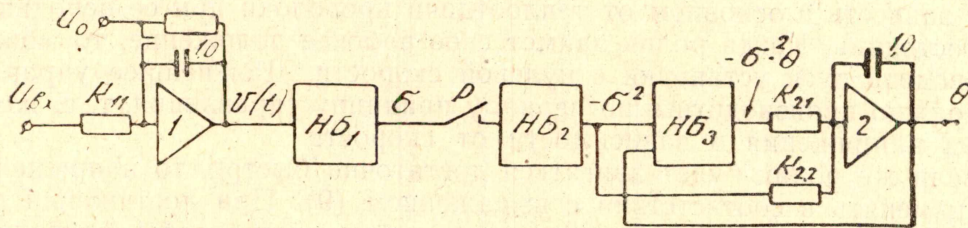


Рис. 4. Структурная схема математической модели нагреваемого участка проволоки.

значение отдельных элементов схемы приведены в [2]. Для упрощения закон изменения скорости движения проволоки принят линейным.

На модели получено: температура конечного нагрева отдельных точек проволоки во время ее разгона при соблюдении требуемого за-

кона  $U=f(v)$  остается постоянной и равна заданной ( $\sim 580^\circ\text{C}$ ), т. е. все точки «заправочного» конца проволоки нагреваются до одной и той же температуры.

Принятый алгоритм управления справедлив для получения качественного нагрева проволоки как для периода пуска установки, так и для нормального режима в случае отклонения скорости от нормальной.

### Выводы

1. Для обеспечения качественного нагрева проволоки в пусковой период, включая и «заправочный» конец, можно использовать предложение группы инженеров (Кашина и др.), с рекомендациями п. п. 2 и 3.

2. Скорость передвижения «холодного» контакта может быть различной, но постоянной в период пуска, для чего необходимо выдерживать зависимость между напряжением и положением контакта (длиной пройденного участка), согласно рис. 2.

В период остановки контакта проволока должна мгновенно приобрести скорость контакта.

3. Система автоматического управления нагревом проволоки должна быть построена по принципу изменения напряжения в зависимости от скорости ее движения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Рикконен, Ю. С. Мельников. Расчет параметров электрического отжига движущейся проволоки, *Электротехника*, № 9, 1964.

2. В. М. Рикконен, Ю. С. Мельников. Исследование процесса нагрева движущейся проволоки с применением математического моделирования, *Известия ТПИ*, т. 141, 1966.