



## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС

П.Н. Петухов (ВКО «Алмаз-Антей»), Ю.П. Юленец, А.В. Марков (ФГБОУ ВО «СПбГТИ(ТУ)»)

Представлена автоматизированная система управления оптимальным в отношении качества сварного соединения режимом высокочастотной сварки пластмасс. Задача определения оптимального, удовлетворяющего двум показателям качества, режима сварки рассмотрена применительно к несимметричной конструкции технологической оснастки, когда между одной из свариваемых деталей и электродом рабочего конденсатора размещен вкладыш из термостойкого диэлектрика.

Ключевые слова: высокочастотная сварка пластмасс, качество сварки, оптимальный режим, автоматизированная система управления.

### Введение

Сварка пластмасс в высокочастотном (ВЧ) электрическом поле выгодно отличается от других методов сварки возможностью быстрого и локального (только в зоне свариваемого шва) нагрева соединяемых поверхностей без проплавления всего объема материала [1]. Этим преимуществом определяется и высокое качество сварного соединения: механическая прочность – на уровне целого материала, минимальное отклонение формы соединяемых дета-

лей от заданной. Однако для достижения подобного результата требуется весьма трудоемкий и не всегда успешный экспериментальный подбор режимных параметров процесса, индивидуальный для каждой конструкции сварочной технологической оснастки. Между тем данная задача может быть решена теоретическим путем на основе анализа температурного поля в материале [2, 3]. В работе [4] приведены полученные экспериментально показатели качества сварки деталей из полиамида-610 в различных режимах в несимметричной технологической оснастке, когда между одной из соединяемых деталей и электродом рабочего конденсатора размещен вкладыш из термостойкого диэлектрика с малыми диэлектрическими потерями. Отметим, что несимметричная конструкция технологической оснастки как обеспечивающая ряд преимуществ наиболее распространена в промышленной практике. Вместе с тем именно ВЧ-сварка пластмасс в несимметричных электродах наименее изучена, а вопросы автоматизации данного процесса и управления качеством продукции практически не разработаны. Настоящая работа посвящена разработке АСУ процессом, реализующей оптимальный в отношении качества режим сварки.

### Постановка задачи и метод исследования

Распределение температуры в каждом слое многослойной пластины, схематично представляющей конструкцию рабочего конденсатора с одним изолированным электродом (рис. 1), описывается уравнением нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла [4]:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{c_{pi}(T_i)\rho_i} \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{p_i(\tau)}{c_{pi}(T_i)\rho_i}, \quad i = 2, 3 \quad (1)$$

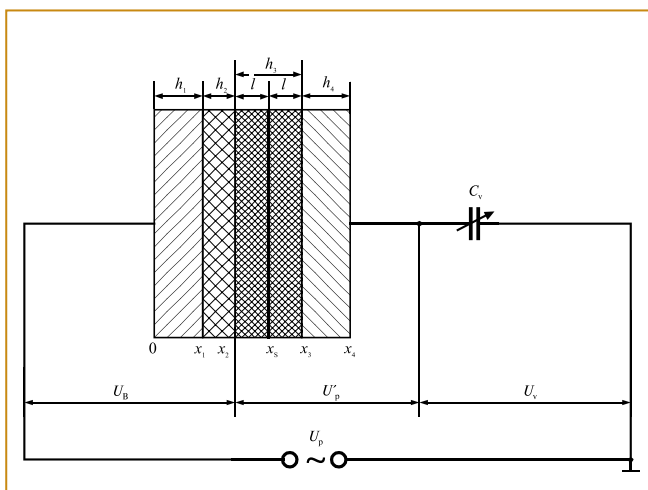


Рис. 1. Схема сварочной технологической оснастки, где  $h_1, h_4$  – толщина высокопотенциального и толщина заземленного электродов соответственно;  $h_2$  – толщина изоляционного вкладыша;  $l = h_3/2$  – толщина свариваемой детали;  $x_1$  – координата границы слоя;  $x_s$  – координата сварного шва;  $y_1, y_2$  – расстояния от сварного шва;  $U_p$  – напряжение, подводимое от ВЧ-генератора;  $U_B$  – напряжение на изоляционном вкладыше;  $U'_p$  – напряжение на рабочем конденсаторе;  $U_V$  – напряжение на регулировочном конденсаторе  $C_v$

с начальными и граничными условиями:

$$T = T_0 \text{ при } \tau = 0 \quad x_1 \leq x \leq x_3, \quad (2)$$

$$T_2|_{x=x_1} = T_{R1}, \quad T_3|_{x=x_3} = T_{R2} \quad (3)$$

$$T_2 = T_3, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x = x_2, \quad (4)$$

Здесь  $T$  – локальная температура;  $T_0$  – начальная температура термопласта;  $T_{R1}$ ,  $T_{R2}$  – значения температуры электродов рабочего конденсатора;  $x$  – текущая толщина слоя;  $x_i$  – координата границы слоя;  $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\rho$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала слоя соответственно;  $i$  – номер слоя: 1 – металл, 2 – изолятор, 3 – свариваемый термопласт, 4 – металл;  $\tau$  – время.

Удельная мощность  $p$ , отлична от нуля только для термопласта [5, 6]:

$$p_3 = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''_3(T) E^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха);  $\varepsilon''_3 = \varepsilon'_3 \operatorname{tg} \delta_3$  – фактор диэлектрических потерь термопласта;  $\varepsilon'_3$ ,  $\operatorname{tg} \delta_3$  – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь термопласта соответственно;  $E$  – средняя напряженность электрического поля в термопласте;  $f$  – частота электромагнитного поля.

Включим последовательно с рабочим конденсатором конденсатор переменной емкости  $C_v$  (рис. 1).

Соотношение, связывающее напряженность электрического поля  $E$  с напряжением  $U_p$  на рабочем конденсаторе плоскопараллельной конструкции с изоляционным вкладышем, выражается формулой:

$$E = \frac{U_p}{\varepsilon'_3 \sum_{i=2}^3 \frac{h_i}{\varepsilon'_i}}, \quad (6)$$

где  $h_i = x_i - x_{i-1}$  толщина слоя.

При  $\operatorname{tg} \delta_3 \leq 0,3$  напряжения  $U_p$ ,  $U_B$ ,  $U_V$  на конденсаторах  $C_p$ ,  $C_B$  и  $C_v$  распределяются обратно пропорционально их емкостям:  $U_p C_p \approx U_B C_B = U_V C_v$ .

Подставим в (6) значение  $U_p = U'_p + U_B + U_V$  и получим выражение для расчета напряженности поля в рабочем конденсаторе  $C_p$  с изоляционным вкладышем и дополнительным конденсатором  $C_v$ . Это соотношение показывает принципиальную возможность изменения напряженности электрического поля в термопласте и мощности  $p_3$  изменением емкости конденсатора  $C_v$ .

Качество сварки зависит от глубины прогрева околошовной зоны (ОШЗ), которая в рассматриваемом случае неодинакова для первой и второй свариваемой детали. Таким образом, кроме времени сварки  $\tau_{св}$  – момента достижения в сварном шве температуры текучести (или температуры плавления)

термопласта  $T_{3\max} = T_{\text{тек}}$  в задачу определения оптимального режима должен входить расчет суммарной глубины прогрева околошовной зоны  $y$ , при которой будут обеспечены наилучшие качественные показатели сварного соединения. С этой целью уравнение (1) с условиями (2) – (5) решается численно при дополнительном условии:

$$T_3|_{x_s - y_2} = T_p, \quad T_3|_{x_s + y_2} = T_p,$$

где  $T_p$  – температура размягчения термопласта;  $y_1$ ,  $y_2$  – глубины прогрева соединяемых деталей ( $y = y_1 + y_2$ );  $x_s$  – координата сварного шва.

Для большинства термопластов зависимость фактора диэлектрических потерь от температуры резко нелинейна, что существенно усложняет определение мгновенного значения удельной мощности внутренних источников тепла. Между тем, согласно [7], мгновенная удельная мощность  $p(\tau)$  (здесь и далее индекс «3» опущен), вместо расчета по уравнениям (5), (6), может быть найдена через текущие (контролируемые) параметры объекта (ВЧ-генератора с рабочим конденсатором  $C_p$  и дополнительным регулируемым конденсатором  $C_v$ ) – рис. 1:

$$p(\tau) = \frac{x_{св}^2}{2r_1 V} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2r_1}{x_{св}} \right)^2 \left( \frac{\gamma I_{ао}(\tau)}{\sqrt{2} r_1 \omega^2 C_3 C_v U_V(\tau)} - 1 \right)} - 1 \right]^2 * [\omega C_v U_V(\tau)]^2, \quad (7)$$

где  $x_{св}$  – реактивное сопротивление элемента связи между контурами двухконтурного генератора;  $\omega$  – угловая частота:  $\omega = 2\pi f$ ;  $r_1$  – сопротивление активных потерь в первичном (анодном) контуре генератора;  $V$  – объем термопласта в рабочем конденсаторе;  $\gamma = \alpha_1/\alpha_0$ ,  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  – коэффициенты разложения в ряд импульса анодного тока генератора;  $I_{ао}$  – постоянная составляющая анодного тока генератора;  $C_3$  – эквивалентная емкость генераторной лампы.

В таблице приведены полученные расчетным путем значения времени сварки  $\tau_{св}$  и глубины прогрева ОШЗ  $y/2l$  деталей плоской формы из полиамида-610 в различных режимах. В эту же таблицу включены экспериментальные данные оценки качества сварных соединений [4].

Качество сварки оценивалось испытаниями соединений на прочность, а также путем инструментального контроля плоскостности готовых изделий. В таблице обозначено:  $\sigma'$  – относительное значение механической прочности сварного соединения:  $\sigma' = \sigma/\sigma_p$ , где  $\sigma$ ,  $\sigma_p$  – абсолютное значение механической прочности сварного соединения и механическая прочность целого материала при растяжении (для полиамида-610  $\sigma_p = 50$  МПа) соответственно;  $\beta$ ,  $\beta'$  – абсолютное и относительное значения отклонения формы изделия от плоскостности соответственно:

Таблица. Определение оптимального режима ВЧ-сварки деталей из полиамида 610 по глубине прогрева околошовной зоны:  $2l = 4$  мм,  $f = 27,12$  МГц, сварочное давление  $F = 0,4$  МПа,  $T_H = T_R = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{ТЕК}} = 225^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 200^\circ\text{C}$ , изоляционный вкладыш из микалекса:  $h_2 = 2,5$  мм,  $\lambda_2 = 0,25$  Вт/м·К,  $\varepsilon'_2 = 7$

№ режима	$U_p = (U'_p + U_n + U_v)$ , В	$\tau_{\text{СВ}}$ , с	$y/2l$	$I_1 = \sigma'$	$\beta$ , мм	$I_2 = 1/\beta'$	$I$
1	900	24,6	0,477	0,7	0,06	1,667	1,167
2	1000	19,3	0,497	0,77	0,064	1,563	1,203
3	1100	15,7	0,518	0,84	0,067	1,493	1,254
4	1150	14,2	0,528	0,87	0,068	1,471	1,279
5	1200	13,0	0,539	0,9	0,069	1,449	1,304
6	1250	11,9	0,550	0,92	0,07	1,429	1,314
7	1300	11,0	0,560	0,93	0,072	1,389	1,292
8	1350	10,1	0,571	0,94	0,075	1,333	1,253
9	1400	9,4	0,582	0,95	0,079	1,266	1,203
10	1450	8,7	0,592	0,95	0,086	1,163	1,105
11	1500	8,1	0,602	0,95	0,1	1,000	0,950

$\beta' = \beta/\beta_{\text{max}}$ , где  $\beta_{\text{max}}$  – максимальное абсолютное значение отклонения формы изделия от плоскостности.

Выбор решения в задаче оптимизации с несколькими частными критериями представляет собой компромисс, так как увеличение одного показателя (в данном случае  $\sigma'$ ) приводит к уменьшению другого (в данном случае  $1/\beta'$ ). При справедливом компромиссе стремятся к тому, чтобы в какой-то точке пространства управляющих параметров процесса сумма относительных изменений всех показателей была равна нулю. В таком случае сводный критерий оптимальности (критерий качества сварки)  $I$ , равный произведению частных критериев  $I = I_1 \cdot I_2$ , достигает максимума [8].

По данным таблицы оптимальными в отношении качества ВЧ-сварки деталей из полиамида-610 в несимметричной конструкции технологической

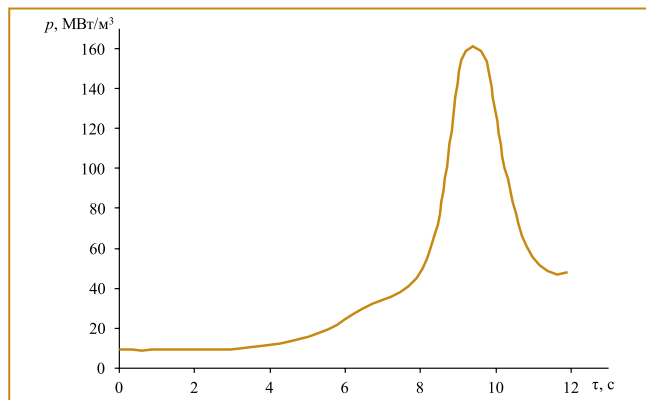


Рис. 2. Зависимость удельной мощности внутренних источников тепла от времени в оптимальном режиме ВЧ-сварки деталей из полиамида-610:  $2l = 4$  мм,  $f = 27,12$  МГц,  $T_H = T_R = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{ТЕК}} = 225^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 200^\circ\text{C}$ ,  $h_1 = h_4 = 6$  мм,  $h_2 = 2,5$  мм,  $\lambda_2 = 0,25$  Вт/м·К,  $\varepsilon'_2 = 7$

оснастки являются режимные параметры процесса, обеспечивающие суммарную глубину прогрева околошовной зоны в пределах:  $y/2l = 0,54...0,56$ .

Очевидно, что в оптимальном режиме, то есть в режиме, удовлетворяющем условию  $y/2l = 0,54...0,56$ , удельная мощность внутренних источников тепла должна соответствовать вполне определенной закономерности  $\bar{p}(\tau)$  – временной программе (рис. 2). Соответственно основной задачей управления сварочной установкой (управления качеством продукции) является программное (по найденному закону) регулирование мощности.

Структурная схема автоматизированной системы управления процессом ВЧ-сварки пластмасс в несимметричной конструкции технологической оснастки приведена на рис. 3.

На схеме обозначено: блок 1 – расчетное устройство для вычисления по выражению (7) в реальном времени мгновенной удельной мощности  $p(\tau)$  по поступающим из объекта информационным сигналам  $I_{\text{ao}}(\tau)$  и  $U_v(\tau)$  и для вычисления (также в реальном времени) коэффициента передачи объекта  $k_{\text{об}}$ ; блоки 2 – 5 составляют систему программного регулирования мощности. Во избежание нагрева от свариваемого материала электроды рабочего конденсатора как вариант конструкции технологической оснастки выполнены охлаждаемыми, их температура  $T_R = T_{R1} = T_{R2}$  поддерживается постоянной с помощью автоматического регулятора расхода воды.

Работой сварочной установки управляет микроконтроллер.

Оператор вводит исходные данные в микроконтроллер, осуществляет загрузку технологической оснастки деталями изделия, подает давление на пресс, осуществляет пуск АСУ. Время сварки, рассчитанное заранее, задается в качестве уставки в программный регулятор мощности. На входе регулятора мощности установлено также программное задание  $\bar{p}(\tau)$ .

При пуске АСУ включается режим НАГРЕВ ВЧ-генератора, и блоком 1 автоматически запускаются расчетные операции. Непрерывно вычисляемые значения  $p(\tau)$  и  $k_{\text{об}}(\tau)$  поступают на вход регулятора мощности 2. Сигнал рассогласования между текущим значением  $p(\tau)$  и программным заданием  $\bar{p}(\tau)$  в виде напряжения постоянного тока  $\Delta E_{\text{упр}}$  после суммирования в блоке 3 со значением  $\Delta E_{\text{упр0}}$ , соответствующим номинальному значению емкости конденсатора  $C_v$  (блок 3), подается на вход источника постоянного напряжения (ИПН) – блок 4.

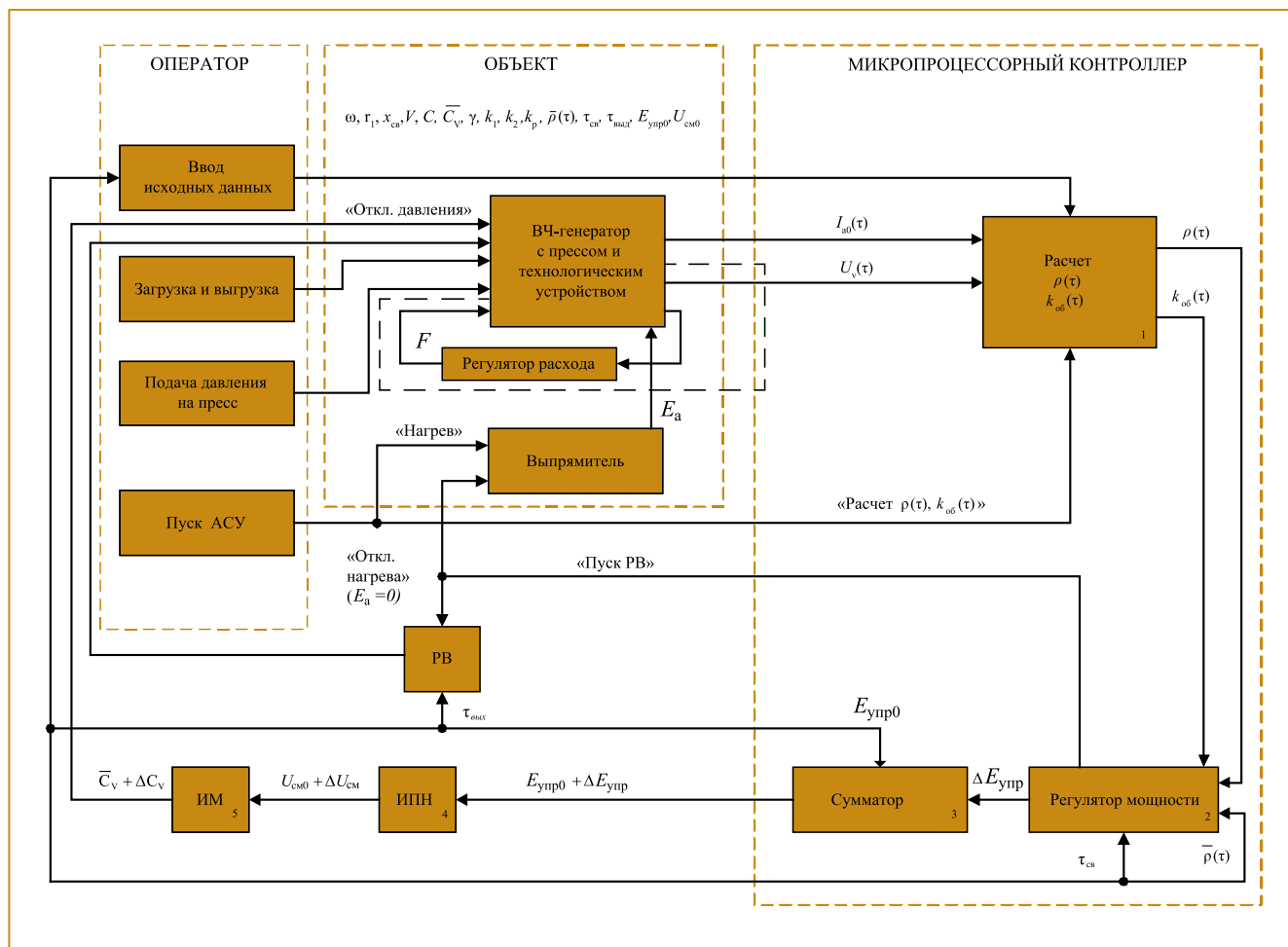


Рис.3. Структурная схема АСУ качеством производственного процесса высокочастотной сварки корпусов химических источников тока

Последний вырабатывает напряжение смещения  $U_{см}$ , необходимое для управления работой электронного исполнительного механизма (блок 5). В качестве исполнительного механизма (ИМ) в схеме АСУ применена реактивная лампа (пентод), изменяющая свою емкость  $C_v$  при изменении постоянного напряжения на своей управляющей сетке [9].

В отличие от коэффициентов передачи остальных звеньев системы коэффициент передачи объекта  $k_{об}$  является переменным во времени и вычисляется непрерывно:

$$k_{об}(\tau) = \frac{\partial p(\tau)}{\partial C_v} ; k_p = \frac{\Delta E_{упр}}{\Delta p} ; k_1 = \frac{\Delta U_{см}}{\Delta E_{упр}} ; k_2 = \frac{\Delta C_v}{\Delta U_{см}}$$

Здесь:  $k_p, k_1, k_2$  – коэффициенты передачи регулятора (блок 2), блоков 3 и 4 соответственно;  $E_{упр}$  – управляющее напряжение постоянного тока;  $U_{см}$  – напряжение смещения;  $\Delta p, \Delta E_{упр}, \Delta U_{см}, \Delta C_v$  – отклонения переменных от их значений в номинальном режиме. Производная, вычисляемая при расчете коэффициента передачи объекта  $k_{об}$ , получена аналитически дифференцированием выражения (7).

Регулятор мощности компенсирует отклонение удельной мощности  $p(\tau)$  от программного задания на протяжении всего цикла сварки путем автоматического и безынерционного изменения емкости реактивной лампы на величину  $\Delta C_v$ .

По истечении времени сварки  $\tau_{св}$  по сигналу от блока 2 режим НАГРЕВ ВЧ-генератора отключается. Одновременно включается реле времени (РВ) на время выдержки  $\tau_{выд}$  готового изделия под прессом для охлаждения. По истечении времени  $\tau_{выд}$  по сигналу от РВ давление с прижимной плиты пресса снимается, и оператор извлекает из технологической оснастки готовое изделие.

**Вывод**

Эффективность применения АСУ оценивалась сопоставлением показателей качества сварки изделий из полиамида-610 в неоптимальном и оптимальном режимах в производственных условиях. Контроль качества готовой продукции проводили испытаниями механической прочности сварных швов при растяжении (по ГОСТ 11262-2017). Проведены также испытания на герметичность соединений (подачей сжатого воздуха в образцы) и отклонение формы готовых изде-

лий от плоскостности (инструментальный контроль). Установлено, что во всех случаях разрушение образцов, изготовленных в оптимальном режиме, происходило вне плоскости сварки. Герметичность полученных в оптимальном режиме сварных соединений также составила 100%. Брак продукции, вызванный отклонением формы изделия от плоскостности, в оптимальных условиях сварки не превышал 2%. Таким образом, в оптимальном режиме работы сварочной установки УЗП-2500Е брак продукции, обусловленный негерметичностью сварных соединений корпусов химических источников тока и отклонением формы готовых изделий от заданной, составляет ~2% по сравнению с 20...25% в неоптимальном режиме.

Рассмотренная АСУ может быть использована в процессах высокочастотной сварки изделий из термопластичных материалов, обладающих заметными диэлектрическими потерями (поливинилхлорид, капрон, полиамид, поливинилиденхлорид).

#### Список литературы

1. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов. М.: Химия. 2001. 376 с.
2. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. - СПб: изд-во Политехн. ун-та. 2015. 571 с.
3. Марков А.В. Метод прогнозирования качества сварки термопластов // Пластические массы. 2006. № 5. С. 44 – 46.
4. Осипова Е.В., Марков А.В. Справедливый компромисс в задаче выбора оптимального по качеству режима сварки пластмасс //Тр. XXX междунар. научной конф. «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-30)». СПб: Политехн. ун-т Петра Великого. 2017. Т.12. Ч. 1. С. 506 – 509.
5. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н., Парини В.П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М. -Л.: Госэнергоиздат. 1959. 480 с.
6. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. Л.: Машиностроение. 1980. 71 с.
7. Марков А.В., Юленец Ю.П. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева // Электротехника. 2007. № 7. С. 60 – 64.
8. Автоматическое управление в химической промышленности. Под ред. Е.Г. Дудникова. М.: Химия. 1987. 368 с.
9. Баркан В.Ф., Жданов В.К. Радиоприемные устройства. М.: Советское радио. 1978. 462 с

*Петухов Павел Николаевич - инженер, аспирант заочного обучения Научно-образовательного центра Северо-Западного регионального центра ВКО «Алмаз-Антей»,  
Юленец Юрий Павлович - д-р техн. наук, проф., проф. кафедры системного анализа и ИТ,  
Марков Андрей Викторович - д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры процессов и аппаратов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).  
E-mail: ippaveln@gmail.com, yyp2807@mail.ru, markov-av@yandex.ru*

#### ABB запускает самую быструю и точную в мире систему обнаружения утечек газа и измерения парниковых газов на базе дронов

Для решения задачи доставки промышленного и бытового газа трубопроводы часто прокладывают в труднодоступных районах. Операторы таких сетей должны обеспечивать безопасность, целостность и надежность трубопроводов, но обнаружение утечек невидимого и лишнего запаха газа может стать сложной и дорогостоящей задачей. HoverGuard™, последнее дополнение к мобильной системе обнаружения утечек газа ABB Ability™ Mobile Gas Leak Detection System, позволяет обнаруживать утечки быстрее и точнее, чем когда-либо прежде.

HoverGuard обнаруживает утечку газа быстро, безопасно и безошибочно и отображает ее на карте. Она способна уловить утечку на расстоянии до 100 метров от распределительных трубопроводных сетей и магистральных трубопроводов, промышленных трубопроводов, хранилищ и других потенциальных источников. Система автоматически генерирует детальные цифровые отчеты, готовые к отправке через несколько минут после обследования.

Решение подключено к облаку, это первая система на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяющая в полете определять в непрерывном режиме количество трех наиболее важных парниковых газов — метана, двуокиси углерода и водяного пара. Каждый парниковый газ по-разному влияет на окружающую среду и присутствует в воздухе в разном объеме. Чрезвычайно быстрый отклик и высокая точность анализатора позволяют ученым и исследователям безошибочно определять потоки парниковых газов, что дает важную информацию для изучения сложных экологических процессов, затрагивающих изменение климата и загрязнение окружающей среды.

Запатентованная лазерная абсорбционная спектроскопия с улучшенной резонаторной способностью обнаруживает метан с чувствительностью в 1000 раз выше и в 10 раз быстрее, чем обычные приборы для обнаружения утечек. Такие чувствительность и быстрота работы позволяют HoverGuard обнаруживать утечки во время полета со скоростью более 88 км/ч на высоте ≥40 м. За счет использования недорогих коммерческих БПЛА с полезной нагрузкой до 3 кг решение позволяет ежеминутно проводить мониторинг значительной территории.

Технология HoverGuard позволяет повысить безопасность трубопроводной сети вне зависимости от того, расположена ли она в безлюдной местности или в городе, путем обнаружения и картографирования утечек природного газа в труднодоступных местах, таких как мосты, участки с ограничениями полосы отвода или непроходимой растительностью, газохранилища и трубопроводы.

HoverGuard дополняет существующие предложения ABB по обнаружению утечек газа, включающие MobileGuard™ для транспортных средств, портативного MicroGuard™ и стационарного EverGuard™ (выпуск запланирован на конец 2021 г.). Все они могут работать независимо от других решений и друг от друга. При их объединении создается платформа для наиболее всестороннего обнаружения, картографирования и количественного определения утечек с беспрецедентной скоростью, надежностью и точностью во всей газовой инфраструктуре, включая добычу, хранение, переработку, транспортировку и сбыт.

[Http://www.abb.ru](http://www.abb.ru)