

УДК 658.512:629.331

## Автоматизированная система управления качеством изготовления резистивного герметика автомобильных свечей зажигания

А. Н. Ильин<sup>1</sup>, Е. А. Филонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>aleksandr.ilin.71@mail.ru, <sup>2</sup>filonina.ea@gmail.com

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступило в редакцию 22.12.2013

**Аннотация.** Проведен многофакторный эксперимент, выявлены значимые факторы и компоненты, влияющие на свойства герметика, получены регрессионные модели электрического сопротивления в зависимости от параметров компонентов и температуры с целью определения их в процессе производства, а также управления ими для повышения качества и стабильности технологического процесса. Выполнен синтез системы управления качеством изготовления герметика и представлены результаты моделирования ее работы.

**Ключевые слова.** Резистивный герметик; система автоматического управления; синтез; многофакторный эксперимент; регрессионный анализ

Традиционные технологические схемы изготовления резистивного герметика для герметизации узлов свечных изделий различного назначения не учитывают современной тенденции повышения качества выпускаемой продукции. Это связано с отсутствием четкого определения факторов, влияющих на процесс приготовления, а также границ изменения этих факторов. Настоящая работа является попыткой решить проблему повышения качества изготовления герметика и управления путем автоматизации технологического процесса и выявления основных факторов, влияющих на него с точки зрения теории управления.

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В современных автомобильных искровых свечах зажигания герметичность обеспечивается при помощи резистивного герметика, который выполняет роль помехоподавительного резистора.

Он располагается в канале изолятора из керамического материала между центральным электродом и контактной головкой для закрепления их в изоляторе. Герметик обеспечивает требуемое электрическое сопротивление в цепи: центральный электрод – контактная головка.

Материал герметика представляет собой композицию, состоящую из кристаллического каркаса и связующего компонента – стеклофа-

зы. Кристаллическая фаза создает требуемое электрическое сопротивление. Стеклофаза служит для герметизации и цементирования композиции в процессе горячей армировки. Для обеспечения герметичности и создания натяга в процессе охлаждения коэффициенты термического расширения всех компонентов герметика должны быть меньше, чем у керамики. Материал герметика должен обладать полупроводниковыми свойствами и обеспечивать сопротивление в узле в пределах заданных технологических условий на свечу зажигания.

Во время работы искровых свечей зажигания возникают значительные градиенты температур, при этом стабильность резистивных свойств зависит от качества герметика. Резистивный герметик представляет собой многокомпонентный состав. Его свойства зависят от правильности подбора в процентном соотношении состава компонентов с учетом влияния различных температур, которым они подвергаются.

На сегодняшний день не оценен разброс параметров, известна только качественная картина влияния того или иного элемента на свойства герметика.

Нестабильность свойств герметика проявляется, как правило, при многократных циклических нагрузках на термоудар и при эксплуатации автомобильных свечей зажигания. Несовершенство технологического процесса и нестабильность процентного соотношения компонен-

тов герметика приводят к браку после выполнения операции герметизации (армирование) сердечника.

Как правило, в действующем производстве для контроля качества герметика создается пробная партия свечей, по которой оценивается качество партии вновь изготовленного резистивного герметика. При анализе качества контролируются такие параметры, как герметичность по каналу узла изолятора, надежность закрепления центрального электрода и контактной головки, электрическое сопротивление в цепи центрального электрода. При герметизации не допускаются зазор по контактной головке и ее искривление, сколы на изоляторах, утечка воздуха по каналу узла изолятора. Надежность закрепления центрального электрода и контактной головки определяется качеством затекания герметика визуально по рентгеновскому снимку сердечника.

Таким образом, работы по обеспечению качества изготовления герметика являются актуальными.

### ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Решение задачи управления качеством предлагается на основе построения многофакторного плана для выявления значимых факторов и компонентов, влияющих на свойства герметика, с целью определения их в процессе производства, а также управления ими для повышения качества и стабильности технологического процесса. На основе выявленных закономерностей, предполагается построение математической модели, проверка ее на адекватность. На их базе провести синтез системы автоматического управления (САУ) и промоделировать ее работу с помощью инструмента Control Toolbox пакета Matlab.

Исследуемый технологический процесс является относительно устойчивым и стационарным, предполагаем, что он подчиняется нормальному закону распределения. Для описания объекта исследования воспользуемся представлением о кибернетической системе типа «черный ящик». Модель объекта исследования представлена на рис. 1.

Стрелки справа изображают численные характеристики целей исследования и называются параметрами оптимизации (целевыми функциями, значениями отклика). Воздействия называются факторами или входами «черного ящика».

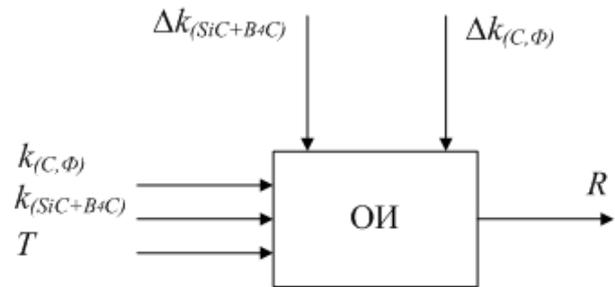


Рис. 1. Модель объекта исследования типа «черный ящик»

Для определения зависимости электросопротивления от влияющих параметров используем данные экспериментов, полученные в керамической лаборатории УАПО (УЗЭТИ).

При этом исследовалась зависимость:

$R = f(T, k_{(C,Ф)}, k_{(SiC+B4C)})$  по методике [1]. В качестве независимых переменных при планировании эксперимента были выделены три фактора:  $x_1$  – концентрация стеклофритты  $k_{(C,Ф)}$ , %;  $x_2$  – концентрация карбида кремния и карбида бора  $k_{(SiC+B4C)}$ , %;  $x_3$  – температура  $T$ , °С. За исходную модель принимается модель вида:

$$Y = \ln R = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

Для каждого фактора выбраны два уровня, на которых он будет варьироваться в эксперименте. Один из уровней верхний, а второй – нижний. Уровни факторов и интервалы варьирования приведены в табл. 1.

Кодирование факторов производилось по формуле:

$$x_i = \frac{2 \cdot (\lg X_i - \lg X_{i\min})}{\lg X_i - \lg X_{i\max}} + 1 \quad (2)$$

где  $i$  – номер фактора;  $x_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;  $X$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;  $X_{i\max}$ ,  $X_{i\min}$  – максимальное и минимальное значения  $i$ -го фактора.

Число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов, определено по формуле:

$$N = 2^k, \quad (3)$$

где  $k$  – число факторов; 2 – число уровней.

Условия эксперимента записаны в виде матрице планирования эксперимента с кодированными значениями факторов. Строки соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов. Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 1

## Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	Факторы		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Верхний +1	69,68	25,82	800
Нижний -1	68,98	25,17	780
Интервал варьирования	0,35	0,325	10

Таблица 2

## Матрица планирования эксперимента

$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\hat{y}$
+	-	-	-	+	+	+	-	9,9	9,7	9,8	9,8
+	-	-	+	+	-	-	+	8,8	8,4	8,2	8,5
+	-	+	-	-	+	-	+	3,1	3,6	3,5	3,4
+	-	+	+	-	-	+	-	2,9	2,4	2,7	2,6
+	+	-	-	-	-	+	+	19,2	18,8	19,1	19,0
+	+	-	+	-	+	-	-	16,1	15,9	15,1	15,7
+	+	+	-	+	-	-	-	10,5	11,3	11,2	11,0
+	+	+	+	+	+	+	+	8,9	10,3	9,9	9,7
Коэффициенты вариации $b_i$											
-12,4	8,1	9,1	5,7	-4,9	-1,4	-2,4	1,8				

Для измерения изменчивости отклонения результата опыта от среднего арифметического использовалась дисперсия. Оценка дисперсии ошибок наблюдений определена по формуле [2]

$$S^2 = S_e / (v \cdot \varphi_2), \quad (4)$$

где  $S_e$  – сумма квадратов ошибок,  $v$  – количество опытов в каждой точке,  $\varphi_2$  – число степеней свободы.

Величина  $S_e$  вычислена с помощью суммы квадратов ошибок:

$$S_e = \sum \sum (y^{ij} - \hat{y}^i)^2, \quad (5)$$

где  $\hat{y}^i$  – среднее значение параметра по  $v$  наблюдениям в  $i$ -й точке;  $y^{ij}$  – значение параметра в  $i$ -й точке.

С числом степеней свободы

$$\varphi_2 = N(v - 1), \quad (6)$$

где  $N$  – количество точек.

Дисперсия, характеризующая ошибку в определении коэффициентов регрессии, определена по формуле

$$S^2_i = S^2 / N. \quad (7)$$

Доверительный интервал  $\Delta b$  рассчитан по формуле

$$\Delta b = S_i \cdot t, \quad (8)$$

где  $t$  – табличное значение критерия Стьюдента при числе степени свободы  $\varphi_2$  и доверительной вероятности  $p=0,95$ . В нашем случае  $t = 2,12$ . Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Расчет доверительного интервала

$S_e$	$\varphi_2$	$S^2$	$S^2_i$	$\Delta b$
2,56	16	0,053	0,0067	0,207

Коэффициенты, вычисленные по результатам эксперимента и представленные в табл. 2, указывают на силу влияния факторов. Обработка экспериментальных данных показывает, что все коэффициенты вариации являются значимыми. Полученная модель проверена на адекватность с помощью критерия Фишера.

Величина критерия Фишера  $F$  определена по формуле

$$F = [S_d / \varphi_1] / [S_e / \varphi_2]. \quad (9)$$

Для проверки адекватности рассчитана сумма квадратов  $S_d$

$$S_d = \sum v \cdot (\bar{y}^i - \hat{y}^i)^2, \quad (10)$$

где  $\bar{y}^i$  – рассчитанные по уравнению значения зависимой переменной.

Число степеней свободы  $\varphi_1$  рассчитано по формуле

$$\varphi_1 = N - (k + 1), \quad (11)$$

где  $k$  – число факторов.

Проверка по критерию Фишера показала, что полученные модели адекватны. Регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$Y = \ln R = -12,3737 + 8,14441x_1 + 9,1114x_2 + 5,6855x_3 - 4,8819x_1x_2 - 1,4552x_1x_3 - 2,4261x_2x_3 - 1,804x_1x_2x_3. \quad (12)$$

После потенцирования получим,

$$R = 4,39 \cdot 10^{-6} \cdot x_1^{8,14} \cdot x_2^{9,1} \cdot x_3^{5,68} \cdot (x_1 \cdot x_2)^{-4,88} \cdot (x_1 \cdot x_3)^{-1,45} \cdot (x_2 \cdot x_3)^{-2,4} \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^{-1,8}. \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) видно, что степень влияния фактора  $x_2$  на значение отклика наиболее сильна, а степень влияния фактора  $x_3$  наиболее низкая, где  $x_2$  – концентрация карбида кремния и карбида бора  $k_{(SiC+B4C)}$ , % ;  $x_1$  – концентрация стеклофритты  $k_{(C,\Phi)}$ , % ;  $x_3$  – температура  $T$ , °С.

Процесс изготовления резистивного герметика описывается уравнением полученной регрессионной модели. На основе данного уравнения синтезирована структура процесса изготовления (рис. 2).

Таким образом, применение полученной модели в реальном производстве позволит технологам целенаправленно управлять технологическим процессом в ручном режиме.

### СИНТЕЗ САУ

С позиции теории управления выходной характеристикой системы будет являться сопротивление резистивного герметика. В настоящее время сопротивление технологически контролируется вручную после окончания цикла производства, следовательно, постоянно действующая обратная связь в системе отсутствует.

Традиционные методы управления (самонастраивающиеся системы с эталонной моделью и т. п.) данную проблему не решают, поскольку сообщение об ошибке модели и реального объекта поступает через разные промежутки времени. Это делает актуальным разработку новых принципов управления.

Электрическое сопротивление резистивного герметика может варьироваться в широких пределах в зависимости от процентного содержания компонентов смеси и от степени обогащения поставляемого сырья. Однако, согласно требованиям конструкторской документации, его необходимо поддерживать в пределах от 4 до 13 кОм. Следовательно, необходимо синтезировать систему управления процессом изготовления резистивного герметика.

Анализ действующего технологического процесса производства позволил сформировать структуру системы управления технологическим процессом с минимальным участием человека, представленную на рис. 3. Она имеет неизменяемую часть, состоящую из весовых дозаторов и печи.

В ходе исследования выполнен расчет передаточных функций системы [3]. Дозатор представляет собой функционально-законченную единицу. Он описывается звеном с коэффициентом передачи, равным единице. Определены передаточные функции элементов контура температуры.

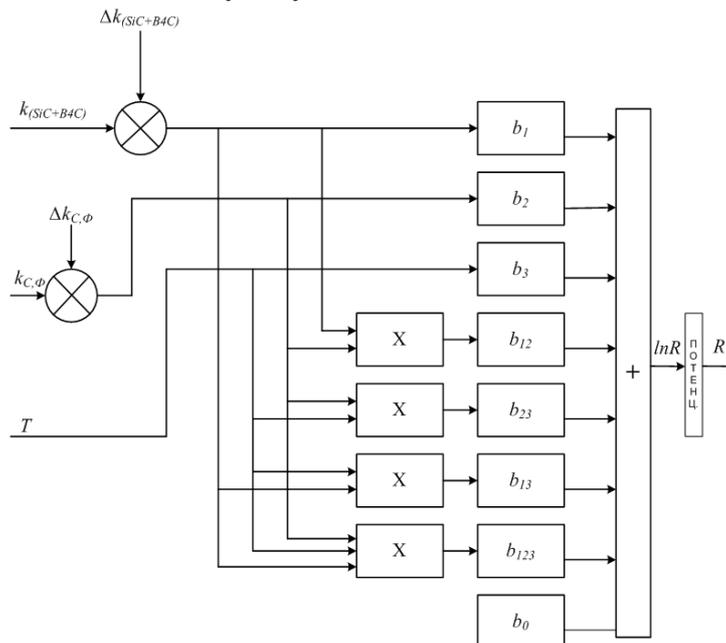


Рис. 2. Структура процесса изготовления герметика

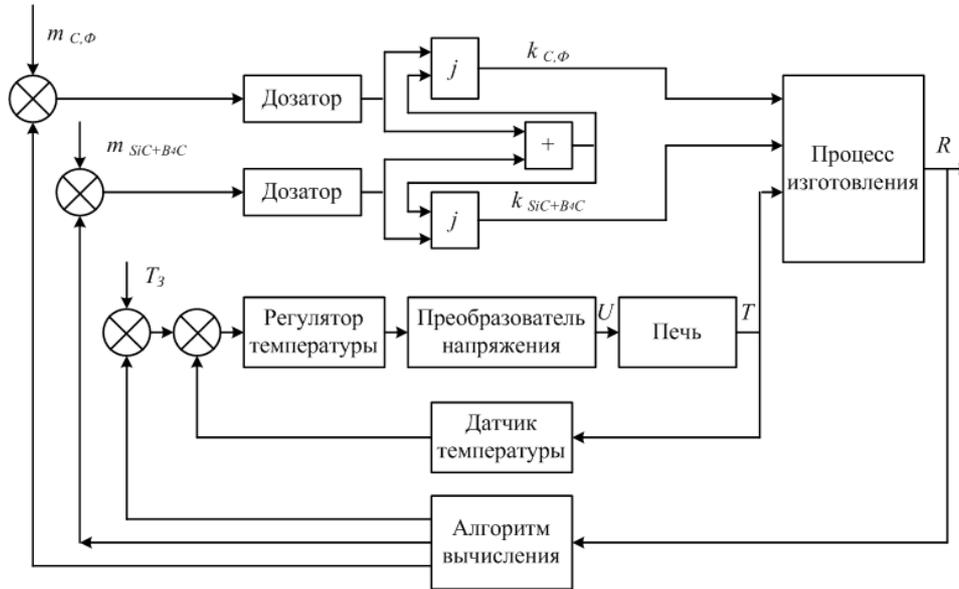


Рис. 3. Структура системы управления процессом изготовления герметика

Печь описывается апериодическим звеном первого порядка

$$W_{II}(p) = \frac{T(p)}{U(p)} = \frac{k_{II}}{T_{II}p + 1} = \frac{2,6316}{10p + 1}, \quad (14)$$

где  $k_{II}$  – коэффициент передачи печи, °C/В;  $T_{II}$  – постоянная времени, с.

Преобразователь напряжения описывается передаточной функцией

$$W_{III}(p) = \frac{T(p)}{U(p)} = \frac{k_{III}}{T_{III}p + 1} = \frac{76}{0,006p + 1}, \quad (15)$$

где  $k_{III}$  – коэффициент передачи преобразователя напряжения, °C/В;  $T_{III}$  – постоянная времени, с.

Датчик температуры представляет собой терморпару и описывается безынерционным звеном

$$W_{DT}(p) = \frac{U_{CT}(p)}{T_{max}(p)} = \frac{5}{1000} = 0,005, \quad (16)$$

где  $U_{CT}(p)$  – стандартное напряжение контура температуры, В;  $T_{max}$  – максимальная температура в печи, °C.

На основе полученных передаточных функций выполнен синтез контура управления температурой. Для настройки регулятора применен метод амплитудно-частотных характеристик. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) объекта представлены на рис. 4.

Анализ АЧХ и ФЧХ показал, что система является статической. Частота среза отсутствует, следовательно, переходные процессы неоправданно велики. Это говорит о том, что есть

необходимость добавления в систему астатизма, а также увеличения коэффициента усиления.

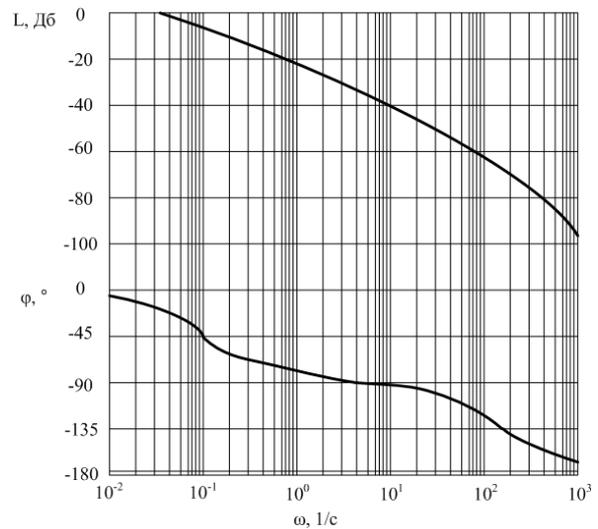
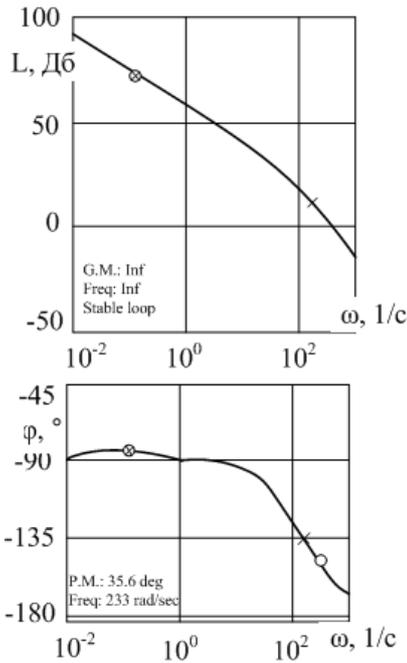


Рис. 4. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики разомкнутого контура температуры

Желаемые характеристики разомкнутого контура температуры приведены на рис. 5. Для построения частотных характеристик применялся инструмент Control Toolbox пакета Matlab. Порядок астатизма равен 1, что обеспечивает астатизм по конечному значению температуры. Следовательно, в области низких частот наклон должен составлять 20 Дб/дек. Для компенсации большого значения постоянной времени печи в числитель регулятора добавлено дифференцирующее звено первого порядка.



**Рис. 5.** Желаемые амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики контура температуры, построенные с помощью инструмента Control Toolbox пакета Matlab

Как видно из рис. 5, ФЧХ не пересекает  $-180^\circ$ , следовательно, система является устойчивой при любом коэффициенте усиления. Путем изменения постоянной времени нуля характеристического уравнения получен запас устойчивости по фазе  $30^\circ$ .

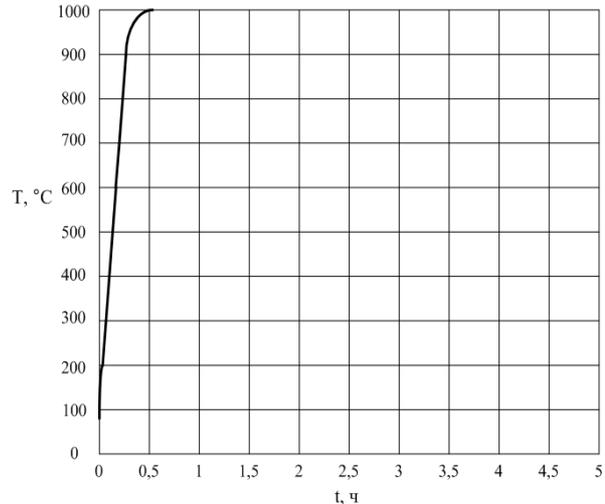
Путем вычитания из желаемой ЛАХ характеристики неизменяемой части получена передаточная функция регулятора

$$W_{pez}(p) = 364 \frac{11p + 1}{p} \tag{17}$$

Переходная характеристика настроенного контура температуры представлена на рис. 6.

### СИНТЕЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

Поскольку изменение концентрации стеклофритты, карбида кремния и карбида бора в сырье является возмущением системы, то предложено регулировать сопротивление резистивного герметика путем изменения массовой дозировки компонентов.



**Рис. 6.** Переходная характеристика настроенного контура температуры

Согласно полученной модели (12) сопротивление герметика равно:

$$\ln R = b_0 + b_1 \cdot k_{c\phi} + b_2 \cdot k_{Si+B4C} + b_3 \cdot T + b_{12} \cdot k_{C\phi} \cdot k_{SiC+B4C} + b_{23} \cdot k_{SiC+B4C} \cdot T + b_{13} \cdot k_{C\phi} \cdot T + b_{123} \cdot k_{C\phi} \cdot k_{SiC+B4C} \cdot T \tag{18}$$

При изменении содержания карбида кремния в сырье сопротивление герметика определяется:

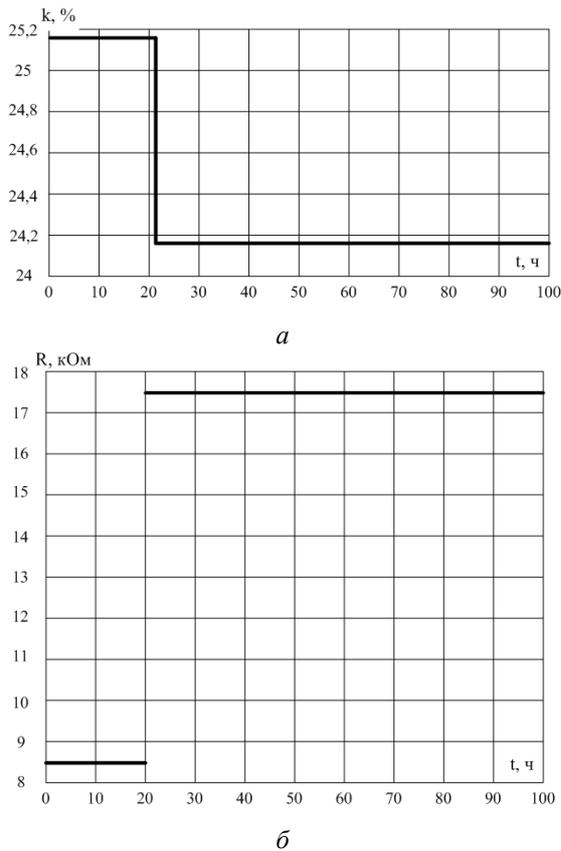
$$\ln R = b_0 + b_1 \cdot k_{c\phi} + b_2 \cdot (k_{Si+B4C} + \Delta \cdot k_{Si+B4C}) + b_3 \cdot T + b_{12} \cdot k_{C\phi} \cdot (k_{SiC+B4C} + \Delta \cdot k_{Si+B4C}) + b_{23} \cdot (k_{SiC+B4C} \cdot T + \Delta \cdot k_{Si+B4C}) \cdot T + b_{13} \cdot k_{C\phi} \cdot T + b_{123} \cdot (k_{C\phi} \cdot k_{SiC+B4C} + \Delta \cdot k_{Si+B4C}) \cdot T \tag{19}$$

В связи с этим промоделирован процесс изменения концентрации на один процент во время второго цикла (время одного цикла 20 ч). Результаты моделирования представлены на рис. 7.

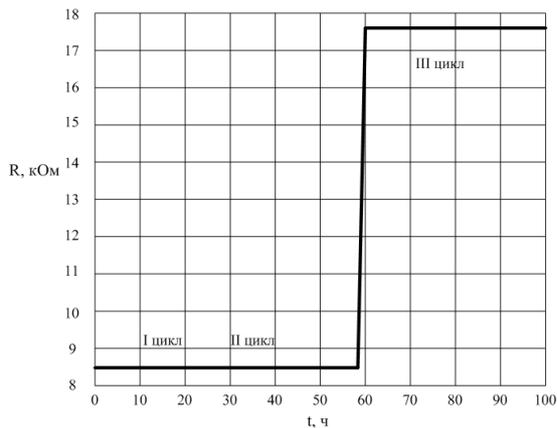
Изменение электрического сопротивления, измеренное в конце цикла, показано на рис. 8.

После измерения сопротивления в конце цикла производится восстановление истинной концентрации одного из компонентов с помощью уравнения модели, при этом другой компонент считается неизменным

$$(k_{Si+B4C} + \Delta k_{Si+B4C}) = \frac{\ln R - b_1 k_{C\phi} + b_3 T + b_{23} k_{C\phi} T + b_0}{b_2 + b_{12} k_{C\phi} + b_{13} k_{C\phi} T + b_{123} k_{C\phi} T} \tag{20}$$



**Рис. 7.** Сопротивление герметика при изменении концентрации карбида кремния в сырье на один процент в начале второго цикла (время одного цикла 20 ч): *а* – концентрация компонентов смеси; *б* – электрическое сопротивление герметика



**Рис. 8.** Сопротивление герметика, измеренное в конце цикла производства

Масса компонента, при которой сопротивление герметика будет равно заданному значению, вычисляется с помощью найденной истинной концентрации:

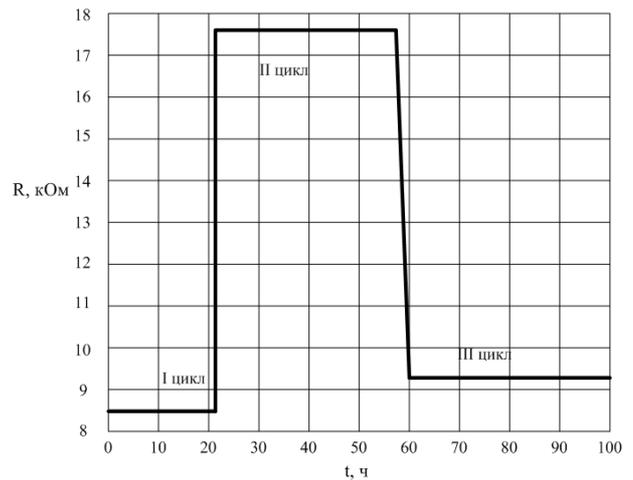
$$m_{SiC+B4C} = (k_{SiC+B4C} + \Delta \cdot k_{Si+B4C}) \cdot M, \quad (21)$$

где  $m$  – масса компонента;  $M$  – масса смеси.

Ошибка по массе определяется по формуле:

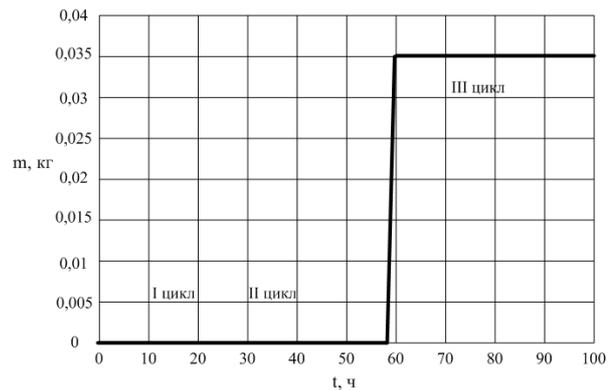
$$\Delta m = m_3 - m. \quad (22)$$

После того как скорректированная масса отправлена на дозатор, на выходе системы получено заданное значение сопротивления. Результаты работы системы представлены на рис. 9.



**Рис. 9.** Изменение сопротивления при работе системы управления

Получаемая статическая ошибка объясняется округлением результатов при расчете коэффициентов алгоритма коррекции по массе. На рис. 10 представлена ошибка по массе, выдаваемая на дозатор.



**Рис. 10.** Ошибка системы по массе

Предлагаемая система работает следующим образом: оператором вводится заданное значение сопротивления и выходное значение полной массы, типовое значение концентрации компонентов при этом хранится в памяти, контроллером рассчитывается масса каждого из компонентов.

Данный методологический подход прошел апробацию в реальном производстве при приготовлении резистивного герметика и показал его эффективность. Использование модели для корректировки технологического процесса, даже без внедрения системы автоматического управления, позволило снизить общий брак на 20 % и стабилизировать технологический процесс. Апробирование полученной модели в реальных условиях производства показало ее высокую эффективность: за три года эксплуатации выбросов за пределы сопротивления герметика не зафиксировано.

### ВЫВОДЫ

1. Проведение многофакторного эксперимента и обработка результатов позволили выявить значимые факторы и степень их влияния на свойства герметика и получить математическую зависимость, адекватно отражающую процессы.

2. Экспериментально установлено, что полученная регрессионная модель электрического сопротивления в зависимости от параметров компонентов и температуры позволяет целенаправленно управлять технологическим процессом, как в ручном режиме, так и составе САУ.

3. Подтверждено, что предлагаемая методология позволяет управлять качеством приготовления резистивного герметика.

4. Синтезирована САУ, позволяющая решать задачи управления качеством изготовления резистивного герметика автомобильных свечей зажигания, и определены ее основные характеристики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Фаддеев М. А. Элементарная обработка результатов эксперимента: учеб. пособие. Лань, 2008. 117 с.
3. Андрищенко В. А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. 251 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Ильин Александр Николаевич**, доц. каф. стандартизации и сертификации. Дипл. инженер (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. создания перспективных свечей и систем зажигания, автоматизации технологических процессов, диагностики технических объектов.

**Филонова Евгения Александровна**, магистрант той же каф. Дипл. инж. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. управления качеством.

### METADATA

**Title:** The automated system for quality control of a resistive automobile spark-plug sealant production.

**Authors:** A. N. Ilyin<sup>1</sup>, E. A. Filonina<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>aleksandr.ilin.71@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), 2013, Vol. 17, No. 2 (51), pp. 34–41. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The multifactorial experiment had been carried out. Significant factors and components affecting properties of the sealant had been identified. Regression models of the electrical resistance depending on the component parameters and temperature were obtained in order to determine them in the manufacturing act and manage them for increase of the technological process quality and stability. The synthesis of sealant production quality control system had been executed. The results of a modeling system are presented.

**Key words:** The resistive sealant, the automatic control system, the synthesis, the multifactorial experiment, regression analysis.

### References (English Transliteration):

1. Y. Adler, E. Markova, Y. Granovsky. Experiment planning in searching for the optimal conditions. M.: Science, 1976. 279 p.
2. M. Faddeev. The elementary analysis of the experiment results: Study guide. Lan, 2008. 117 p.
3. V. Andryushchenko. Theory of Automatic Control Systems: Study guide. L.: publ. LGU, 1990. 251 p.

### About authors:

1. Ilyin, Alexander, docent of USATU chair "Standardization and Certification". Certified specialist of technological processes automation (USATU, 1995). Ph.D. on technological processes automation (USATU, 2000). The investigator in the field of advanced spark plugs and systems creation, technological processes automation, technical objects diagnosis.
2. Filonina, Evgeniya, master student of USATU chair "Standardization and Certification". Certified specialist of standardization and certification (USATU, 2011) The investigator in the field of quality management.