

УДК 007:159.955
ББК 30.17

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ СВАРКИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ
ПО КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА
ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ**

**Резчиков А. Ф.¹, Кушников В. А.²,
Иващенко В. А.³, Фоминых Д. С.⁴, Богомолов А. С.⁵,
Филимонюк Л. Ю.⁶**

*(ФГБУН Институт проблем точной механики
и управления РАН, Саратов)*

Разработаны модели и алгоритмы управления процессом сварки роботизированными технологическими комплексами по критерию качества производимой продукции. Решение задачи выполнено на основе использования модели системной динамики. Внедрение разработанного математического обеспечения позволит повысить качество дуговой сварки в роботизированных комплексах.

¹ Александр Федорович Резчиков, доктор технических наук, профессор, член-корр. РАН (iptmuran@san.ru).

² Вадим Алексеевич Кушников, доктор технических наук, профессор (iptmuran@san.ru).

³ Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

⁴ Дмитрий Сергеевич Фоминых, кандидат технических наук (dm_fominyh@mail.ru).

⁵ Алексей Сергеевич Богомолов, кандидат физико-математических наук, доцент (iptmuran@san.ru).

⁶ Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук (iptmuran@san.ru).

Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс; технологический процесс; системная динамика; показатель качества; управление процессом сварки; математическая модель.

1. Введение

Процесс сварки металлоконструкций в роботизированных технологических комплексах (РТК) требует оценки качества производимой продукции на протяжении всего производственного цикла: постоянный контроль оператором качества сварки в ходе выполнения сварочного цикла, периодический контроль программистом сварочных параметров, полный контроль ОТК сваренного изделия и т.д. Отсутствие контроля качества на каком-либо этапе, например, из-за отсутствия оператора на рабочем месте, отклонения сварочных параметров или нехватки контролеров ОТК повышает риск возникновения бракованной продукции.

В настоящее время разработаны и прошли проверку на практике различные системы контроля качества сварки в РТК [1-4, 6, 7]. Основное внимание в них уделено обеспечению стабильности сварочных параметров и точности позиционирования сварочной горелки. При этом в этих системах недостаточно места уделено оптимизации оперативного управления процессом сварки в РТК по критерию качества выпускаемой продукции.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность разработки и внедрения новых математических моделей и алгоритмов, позволяющих осуществлять управление процессом сварки роботизированными технологическими комплексами по критерию качества производимой продукции.

2. Постановка задачи

Разработать математические модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале $[t_n, t_k]$ при любых допустимых значениях вектора состояний среды $\mathbf{v}(t) \in \{\mathbf{V}\}$ найти вектор

управляющих воздействий на РТК $\mathbf{p}(t) \in \{\mathbf{P}\}$ для минимизации целевой функции

$$(1) \quad Q(t, \mathbf{v}, \mathbf{p}) = \int_{t_H}^{t_K} \sum_{i=1}^n (X_i^3 - X_i(t, \mathbf{v}, \mathbf{p}))^2 \omega_i dt \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$\begin{cases} F_k(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{p}, \mathbf{p}') \geq 0, & k = 1, \dots, n_1, \\ F_k(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{p}, \mathbf{p}') < 0, & k = n_1 + 1, \dots, n_2 \end{cases}$$

и граничных условиях

$$(2) \quad \begin{cases} F_k^{(t_H)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{p}, \mathbf{p}') = 0, & k = n_3, \dots, n_4, \\ F_k^{(t_K)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{p}, \mathbf{p}') = 0, & k = n_4 + 1, \dots, n_5, \end{cases}$$

где X_i^3 , $X_i(t, \mathbf{v}, \mathbf{p})$, $i = 1, 2, \dots, n$, – заданные и фактические показатели качества процесса сварки в РТК соответственно; ω_i – весовой коэффициент i -го показателя; t – время; n_1, \dots, n_5 – известные константы.

3. Математическая модель

Для описания взаимосвязи элементов технологического процесса сварки в РТК использована модель системной динамики, которая позволяет для основных фазовых переменных (системных уровней) построить дифференциальные уравнения следующего вида [9]:

$$(3) \quad dy(t)/dt = y^+(t) - y^-(t),$$

где $y^+(t)$ – положительный темп скорости переменной y , включающий в себя все факторы, вызывающие рост переменной $y(t)$; $y^-(t)$ – отрицательный темп скорости, включающий в себя все факторы, вызывающие убывание переменной $y(t)$.

Темпы расщепляются на произведение функций, зависящих только от «факторов» – комбинаций основных переменных, являющихся функциями системных уровней:

$$y(t)^\pm = g(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)) = f(F_1, F_2, \dots, F_k) = f_1(F_1) f_2(F_2) \dots f_k(F_k),$$

где $F_j = g_j(y_{i1}, \dots, y_{im})$ – факторы, причем $m = m(j) < n$, $k = k(j) < n$ (n – число уровней) [5, 8-12].

При решении задачи (1)–(2) в качестве системных уровней использованы следующие показатели качества процесса сварки в РТК:

X_1 – количество забракованных балок на 100 единиц продукции; X_2 – численность операторов РТК; X_3 – среднее количество остановок РТК на один цикл; X_4 – средняя длина дефектных сварных швов на 1 единицу продукции; X_5 – выполненные работы по плановому обслуживанию РТК; X_6 – численность программистов; X_7 – численность наладчиков сварочного оборудования; X_8 – численность контролеров ОТК; X_9 – численность цеховых технологов; X_{10} – количество дней просрочки поставки материалов и запчастей для ремонта РТК; X_{11} – среднее отклонение напряжения сварочной дуги; X_{12} – среднее отклонение тока на двигателе подающего блока; X_{13} – среднее отклонение манипулятора от программной траектории; X_{14} – наличие на рабочих местах необходимой технологической документации; X_{15} – отклонение давления защитного газа; X_{16} – отклонение давления сжатого воздуха; X_{17} – план производства на заданный период в единицах продукции; X_{18} – количество балок, сданных ОТК с первого предъявления.

На рис.1 представлен граф причинно-следственных связей между показателями качества X_1, X_2, \dots, X_{18} .

На рис. 2 показан подграф системного уровня X_1 .

Для переменной X_1 дифференциальное уравнение (3) имеет вид

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = (X_1^+(t) - X_1^-(t)) = \\ = K_1^N ((N_w f_1(X_3) f_2(X_{11}) f_3(X_{12}) f_4(X_{13})) - (N_s f_5(X_2) f_6(X_8) f_7(X_{17}))),$$

где N_s – количество балок, принятых ОТК и отправленных на сборку; $f_1(X_3)$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от количества остановок РТК; $f_2(X_{11})$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от отклонения напряжения сварочной дуги; $f_3(X_{12})$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от отклонения тока на двигателе подающего блока; $f_4(X_{13})$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от отклонения

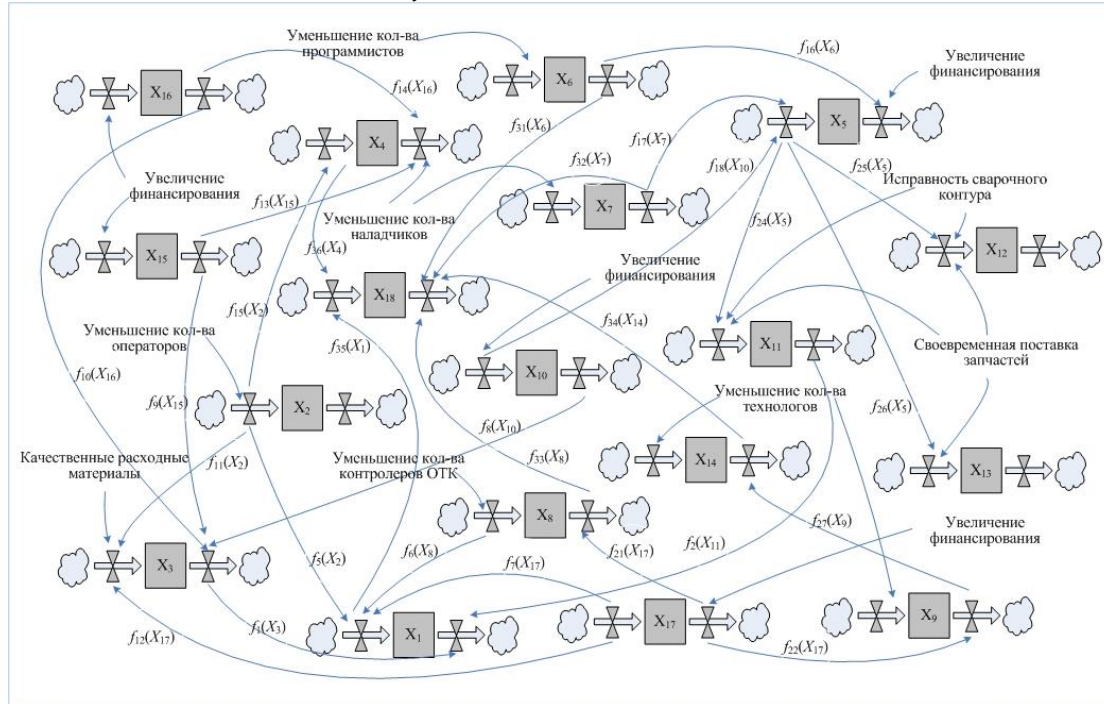


Рис. 1. Граф причинно-следственных связей между показателями качества дуговой сварки

манипулятора от траектории; $f_3(X_2)$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от численности операторов; $f_6(X_8)$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от численности контролеров ОТК; $f_7(X_{17})$ – функциональная зависимость количества забракованных балок от плана производства; K_i^N , $i = 1, 2, \dots, 18$, – коэффициент нормирования для показателя X_i :

$$K_i^N = (X_i(t) - X_i^{\min}) / ((X_i^{\max} - X_i^{\min}) X_i(t)),$$

где X_i^{\min} , X_i^{\max} – соответственно минимальные и максимальные значения показателя X_i . Приняв для всех показателей $X_i^{\min} = 0$, получим $K_i^N = 1/X_i^{\max}$.

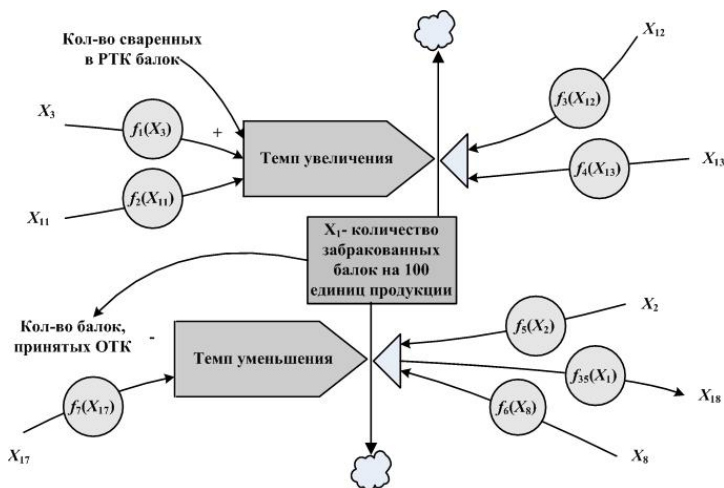


Рис. 2. Подграф системного уровня X_1

Таким образом, уравнение для X_1 примет вид

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{1}{X_1^{\max}} \left((N_w f_1(X_3) f_2(X_{11}) f_3(X_{12}) f_4(X_{13})) - (N_s f_5(X_2) f_6(X_8) f_7(X_{17})) \right).$$

Аналогично составляются уравнения для других переменных. В результате математическая модель примет вид:

$$(4) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{1}{X_1^{\max}} \left((N_w f_1(X_3) f_2(X_{11}) f_3(X_{12}) f_4(X_{13})) - \right. \\ \left. (N_s f_5(X_2) f_6(X_8) f_7(X_{17})) \right), \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = \frac{1}{X_2^{\max}} \left((O_0 + O_{in}) f_{12}(X_{17}) - (Sm + R_w + O_{out}) \right), \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = \frac{1}{X_3^{\max}} \left(\frac{N_{st}}{N_w} f_8(X_{10}) f_9(X_{15}) f_{10}(X_{16}) - S^* f_{11}(X_2) \right), \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = \frac{1}{X_4^{\max}} \left(L d f_{13}(X_{15}) f_{14}(X_{16}) - L^* f_{15}(X_2) \right), \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = \frac{1}{X_5^{\max}} \left(M_f f_{16}(X_6) f_{17}(X_7) - M_p f_{18}(X_{10}) \right), \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = \frac{1}{X_6^{\max}} \left((P_0 + P_{in}) f_{19}(X_{17}) - (Sm + R_w + P_{out}) \right), \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = \frac{1}{X_7^{\max}} \left((R_0 + R_{in}) f_{20}(X_{17}) - (Sm + R_w + R_{out}) \right), \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = \frac{1}{X_8^{\max}} \left((C_0 + C_{in}) f_{21}(X_{17}) - (Sm + R_w + C_{out}) \right), \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = \frac{1}{X_9^{\max}} \left((T_0 + T_{in}) f_{22}(X_{17}) - T_{out} \right), \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{10}^{\max}} \left((N_r + D_f) f_{23}(X_{17}) - D_p \right), \\ \frac{dX_{11}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{11}^{\max}} \left(\Delta_U - \Delta_U^* f_{24}(X_5) \right), \\ \frac{dX_{12}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{12}^{\max}} \left(\Delta_I - \Delta_I^* f_{25}(X_5) \right), \\ \frac{dX_{13}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{13}^{\max}} \left(\Delta_R - \Delta_R^* f_{26}(X_5) \right), \\ \frac{dX_{14}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{14}^{\max}} \left(T d_f f_{27}(X_9) - T d_p \right), \\ \frac{dX_{15}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{15}^{\max}} \left(\Delta_{PG} - \Delta_{PG}^* f_{28}(X_{17}) \right), \\ \frac{dX_{16}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{16}^{\max}} \left(\Delta_{PV} - \Delta_{PV}^* f_{29}(X_{17}) \right), \\ \frac{dX_{17}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{17}^{\max}} \left(N_{TP} f_{30}(X_9) - N_w \right), \\ \frac{dX_{18}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{18}^{\max}} \left(N_d f_{31}(X_6) f_{32}(X_7) f_{33}(X_8) f_{34}(X_{14}) - \right. \\ \left. (Ab + Ld) f_{35}(X_1) f_{36}(X_4) \right). \end{array} \right.$$

В системе уравнений (4) приняты следующие обозначения: O_0 – численность операторов РТК на начало периода планирования; O_{in} – численность принятых операторов РТК за период планирования; O_{out} – численность уволенных операторов РТК за период планирования; Sm – сменность работы производства; Rw – количество РТК, задействованных в производственном процессе; N_{st} – количество остановок РТК за период планирования; S^* – допустимое количество остановок РТК за один сварочный цикл; Ld – общая длина дефектных швов за период планирования; L^* – расчетная длина дефектных швов за период планирования; M_f – количество выполненных мероприятий из графика ППР по обслуживанию РТК; M_p – количество запланированных мероприятий из графика ППР по обслуживанию РТК; P_0 – численность программистов на начало периода планирования; P_{in} – численность принятых программистов за период планирования; P_{out} – численность уволенных программистов за период планирования; R_0 – численность наладчиков сварочного оборудования на начало периода планирования; R_{in} – численность принятых наладчиков сварочного оборудования за период планирования; R_{out} – численность уволенных наладчиков сварочного оборудования за период планирования; C_0 – численность контролеров ОТК на начало периода планирования; C_{in} – численность принятых контролеров ОТК за период планирования; C_{out} – численность уволенных контролеров ОТК за период планирования; T_0 – численность технологов на начало периода планирования; T_{in} – численность принятых технологов за период планирования; T_{out} – численность уволенных технологов за период планирования; Nr – длительность ремонта РТК в днях; D_f – фактический срок поставки запчастей и материалов для ремонта РТК; D_p – запланированный срок поставки запчастей и материалов для ремонта РТК; Δ_U – среднее отклонение напряжения сварочной дуги от номинального значения; Δ_U^* – допустимое отклонение напряжения сварочной дуги от номинального значения; Δ_I – среднее отклонение тока на двигателе подающего механизма от номинального значения; Δ_I^* – допустимое отклонение тока на двигателе подающего механизма от номинального значения; Δ_T – среднее отклонение

манипулятора от запрограммированной траектории; Δ_T^* – допустимое отклонение манипулятора от запрограммированной траектории; Td_f – фактическое количество документов по технологическому процессу; Td_p – необходимое количество документов по технологическому процессу; Δ_{PG} – среднее отклонение давления защитного газа; Δ_{PG}^* – допустимое отклонение давления защитного газа; Δ_{PV} – среднее отклонение давления сжатого воздуха; Δ_{PV}^* – допустимое отклонение давления сжатого воздуха; N_{TP} – количество балок, собранных в соответствии с технологическим процессом; N_d – количество балок, сданных с 1-го предъявления; Ab – количество актов о несоответствующей продукции за период планирования; $f_8(X_{10})$ – функциональная зависимость среднего количества остановок РТК за один цикл от длительности просрочки поставки материалов для ремонта РТК; $f_9(X_{15})$ – функциональная зависимость среднего количества остановок РТК за один цикл от отклонения давления защитного газа; $f_{10}(X_{16})$ – функциональная зависимость среднего количества остановок РТК за один цикл от отклонения давления сжатого воздуха; $f_{11}(X_2)$ – функциональная зависимость среднего количества остановок РТК за один цикл от численности операторов; $f_{12}(X_{17})$ – функциональная зависимость численности операторов от плана производства; $f_{13}(X_{15})$ – функциональная зависимость средней длины дефектных швов от отклонения давления защитного газа; $f_{14}(X_{16})$ – функциональная зависимость средней длины дефектных швов от отклонения давления сжатого воздуха; $f_{15}(X_2)$ – функциональная зависимость средней длины дефектных швов от численности операторов; $f_{16}(X_6)$ – функциональная зависимость выполненных работ по плановому обслуживанию РТК от численности программистов; $f_{17}(X_7)$ – функциональная зависимость выполненных работ по плановому обслуживанию РТК от численности наладчиков; $f_{18}(X_{10})$ – функциональная зависимость выполненных работ по плановому обслуживанию РТК от количества дней просрочки поставки материалов для и запчастей для ремонта; $f_{19}(X_{17})$ – функциональная зависимость численности программистов от плана производства; $f_{20}(X_{17})$ – функциональная зависимость численности наладчиков от плана производства; $f_{21}(X_{17})$ – функциональная зависимость

численности контролеров ОТК от плана производства; $f_{22}(X_{17})$ – функциональная зависимость численности цеховых технологов от плана производства; $f_{23}(X_{17})$ – функциональная зависимость количества дней просрочки поставки материалов для ремонта РТК от плана производства; $f_{24}(X_5)$ – функциональная зависимость отклонения напряжения дуги от выполненных работ по плановому обслуживанию; $f_{25}(X_5)$ – функциональная зависимость отклонения тока на двигателе подающего блока от выполненных работ по плановому обслуживанию; $f_{26}(X_5)$ – функциональная зависимость отклонения манипулятора от выполненных работ по плановому обслуживанию; $f_{27}(X_9)$ – функциональная зависимость наличия необходимой документации от численности цеховых технологов; $f_{28}(X_{17})$ – функциональная зависимость отклонения давления защитного газа от плана производства; $f_{29}(X_{17})$ – функциональная зависимость отклонения давления сжатого воздуха от плана производства; $f_{30}(X_9)$ – функциональная зависимость плана производства от численности технологов; $f_{31}(X_6)$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от численности программистов; $f_{32}(X_7)$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от численности наладчиков; $f_{33}(X_8)$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от численности контролеров ОТК; $f_{34}(X_{14})$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от наличия необходимой технологической документации; $f_{35}(X_1)$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от количества забракованных балок; $f_{36}(X_4)$ – функциональная зависимость количества балок, сданных с первого предъявления, от длины дефектных сварных швов.

4. Алгоритм решения задачи

Для решения задачи (1)–(2) необходимо определить функциональные зависимости f_1, f_2, \dots, f_{36} . Функциональные зависимости определяются путем аппроксимации статистических

данных. В качестве примера рассмотрим аппроксимацию полиномами третьей степени функциональных зависимостей средней длины дефектных швов (X_4):

– от среднего отклонения давления защитного газа (X_{15}):

$$f_{13}(X_{15}) = -1,77X_{15}^3(t) + 3,1X_{15}^2(t) - 1,41X_{15}(t) + 0,71;$$

– от среднего отклонения давления сжатого воздуха (X_{16})

$$f_{14}(X_{16}) = 16,92X_{16}^3(t) - 4,25X_{16}^2(t) + 7,43X_{16}(t) - 0,14;$$

– от численности операторов (X_2):

$$f_{15}(X_2) = -0,05X_2^3(t) + 0,76X_2^2(t) - 4,74X_2(t) + 3,85.$$

В качестве статистических данных для аппроксимации использованы многолетние наблюдения за РТК дуговой сварки на ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс). Выбор степени аппроксимирующих полиномов осуществлялся стандартными средствами пакета прикладных программ Matlab v.7.9 (R2009b).

Графики зависимостей $f_{13}(X_{15})$, $f_{14}(X_{16})$ и $f_{15}(X_2)$ представлены на рис.3.

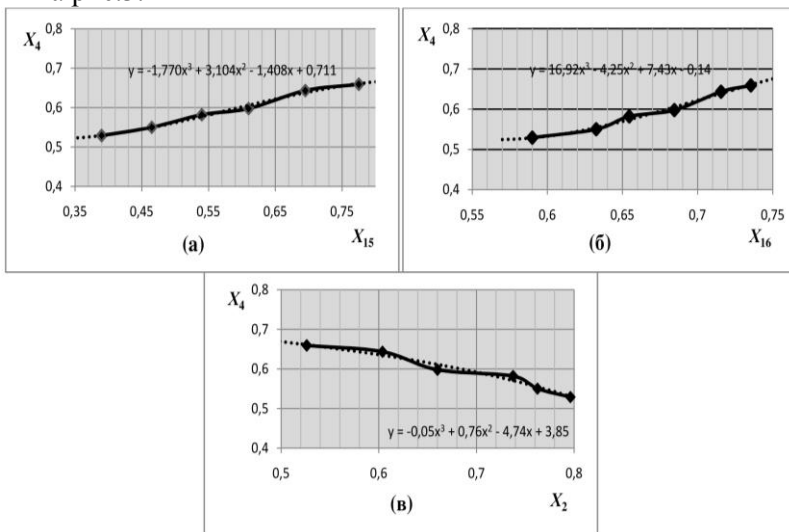


Рис. 3. Графики функциональных зависимостей средней длины дефектных сварных швов на единицу продукции (X_4):

(а) – от среднего отклонения давления защитного газа (X_{15});

(б) – от среднего отклонения давления сжатого воздуха (X_{16});

(в) – от численности операторов РТК (X_2)

Как видно из рис. 3, средняя длина дефектных швов на единицу продукции растет при увеличении отклонения давления защитного газа и сжатого воздуха и падает при увеличении численности операторов РТК.

Ввиду большой размерности системы уравнений (4) решить ее аналитически представляется затруднительным, поэтому эта система решена численно с помощью метода Рунге–Кутты 4 порядка. За начальные условия при этом приняты нормированные показатели качества сварки в РТК, взятые на ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) за 6 месяцев 2016 года (таблица 1).

Таблица 1. Нормированные показатели качества

X_i^{Φ}	Фактические нормированные значения показателей					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
X_1	0,09	0,08	0,08	0,11	0,09	0,09
X_2	0,79	0,61	0,66	0,53	0,76	0,74
X_3	0,12	0,13	0,16	0,24	0,21	0,18
X_4	0,53	0,64	0,58	0,66	0,55	0,59
X_5	0,86	0,97	0,78	0,73	0,65	0,71
X_6	0,63	0,68	0,65	0,57	0,58	0,56
X_7	0,82	0,76	0,83	0,59	0,62	0,62
X_8	0,77	0,71	0,76	0,75	0,89	0,78
X_9	0,27	0,34	0,23	0,48	0,32	0,47
X_{10}	0,33	0,38	0,27	0,42	0,34	0,39
X_{11}	0,36	0,26	0,31	0,18	0,27	0,32
X_{12}	0,19	0,16	0,17	0,15	0,15	0,17
X_{13}	0,63	0,68	0,65	0,57	0,58	0,56
X_{14}	0,84	0,95	0,74	0,82	0,92	0,94
X_{15}	0,77	0,54	0,39	0,46	0,69	0,61
X_{16}	0,65	0,83	0,71	0,78	0,54	0,61
X_{17}	0,97	0,98	0,93	0,92	0,92	0,94
X_{18}	0,96	0,87	0,89	0,85	0,9	0,92

Значения показателей X_1, X_2, \dots, X_{18} определяются путем численного решения системы уравнений (4) с помощью пакета прикладных программ Matlab v.7.9 (R2009b).

Полученные результаты аппроксимированы следующими полиномами:

$$X_1(t) = -6,9655t^3 + 4,2630t^2 - 0,4759t + 0,0941;$$

$$X_2(t) = -0,0002t^3 + 0,0656t^2 + 0,2638t + 0,71;$$

$$X_3(t) = 0,0004t^3 + 0,0024t^2 - 0,0162t + 0,213;$$

$$X_4(t) = 0,0341t^3 + 0,115t^2 + 1,2643t + 0,601;$$

$$X_5(t) = 0,0885t^3 + 0,1767t^2 + 0,2721t + 0,92;$$

$$X_6(t) = -0,0005t^3 + 0,1386t^2 + 0,4654t + 0,702;$$

$$X_7(t) = -0,0005t^3 + 0,1573t^2 + 0,3216t + 0,8032;$$

$$X_8(t) = 0,0004t^3 - 0,1250t^2 + 0,5117t + 0,7091;$$

$$X_9(t) = 0,0003t^3 - 0,0769t^2 + 0,1717t + 0,3175;$$

$$X_{10}(t) = 0,015t^2 + 0,241t + 0,3043;$$

$$X_{11}(t) = -0,0038t^3 - 0,0057t^2 + 0,6534t + 0,303;$$

$$X_{12}(t) = -0,003t^3 - 0,0044t^2 + 0,631t + 0,11;$$

$$X_{13}(t) = -0,0124t^3 - 0,0183t^2 + 0,3387t + 0,17;$$

$$X_{14}(t) = -0,0081t^3 + 0,0273t^2 - 0,1437t + 0,807;$$

$$X_{15}(t) = 0,0007t^3 - 0,2121t^2 + 0,1947t + 0,6908;$$

$$X_{16}(t) = 0,0002t^3 - 0,0578t^2 + 0,3255t + 0,75;$$

$$X_{17}(t) = 0,0006t^3 - 0,0019t^2 + 0,2822t + 0,95;$$

$$X_{18}(t) = -0,0121t^3 + 0,1045t^2 + 0,502t + 0,9001.$$

Для вычисления целевой функции $Q(t)$ необходимо задать значения весовых коэффициентов ω_i . Эти коэффициенты выбраны путем проведения экспертной оценки на основе наблюдений за технологическим процессом:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0,137; \omega_2 = 0,072; \omega_3 = 0,018; \omega_4 = 0,053; \omega_5 = 0,03; \\ \omega_6 &= 0,038; \omega_7 = 0,023; \omega_8 = 0,06; \omega_9 = 0,024; \omega_{10} = 0,067; \\ \omega_{11} &= 0,029; \omega_{12} = 0,072; \omega_{13} = 0,043; \omega_{14} = 0,056; \omega_{15} = 0,057; \\ \omega_{16} &= 0,037; \omega_{17} = 0,08; \omega_{18} = 0,104. \end{aligned}$$

Заданные значения показателей качества процесса сварки определены исходя из опыта эксплуатации РТК Kawasaki с манипуляторами FA10L и контроллерами C40 и приведены ниже:

$$\begin{aligned} X_1^3 &= 0,07; X_2^3 = 0,5; X_3^3 = 0,1; X_4^3 = 0,5; X_5^3 = 0,98; X_6^3 = 0,55; \\ X_7^3 &= 0,85; X_8^3 = 0,9; X_9^3 = 0,3; X_{10}^3 = 0,25; X_{11}^3 = 0,2; X_{12}^3 = 0,3; \\ X_{13}^3 &= 0,6; X_{14}^3 = 0,97; X_{15}^3 = 0,3; X_{16}^3 = 0,6; X_{17}^3 = 1; X_{18}^3 = 1. \end{aligned}$$

Подставляя в (1) значения весовых коэффициентов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{18}$, заданные показатели качества $X_1^3, X_2^3, \dots, X_{18}^3$ и полученные полиномы $X_1(t), X_2(t), \dots, X_{18}(t)$, вычислим значение функции $Q(t)$:

$$Q(t) = \int_{t_H}^{t_K} (6,64t^6 - 8,134t^5 + 3,416t^4 - 0,24t^3 - 0,024t^2 + 0,019t + 0,033) dt.$$

Как видно, полученное выражение возможно решить аналитически с помощью таблиц первообразных:

$$Q(t) = 0,949t^7 - 1,356t^6 + 0,683t^5 - 0,06t^4 - 0,008t^3 + 0,01t^2 + 0,033t \Big|_{t_H}^{t_K}.$$

Результат вычисления функции $Q(t)$ на разных временных отрезках приведен в таблице 2 (шаг измерения – 1 неделя).

Таблица 2. Значения целевой функции $Q(t)$

$t_H; t_K$	[0; 1]	[0; 2]	[0; 3]	[0; 4]	[0; 5]
$Q(t)$	0,0034	0,007	0,011	0,0157	0,0218
$t_H; t_K$	[0; 6]	[0; 7]	[0; 8]	[0; 9]	[0; 10]
$Q(t)$	0,0303	0,0443	0,0715	0,1292	0,251

Опыт эксплуатации РТК показывает, что оперативно-диспетчерский персонал использует сравнительно небольшое количество значений управляющих переменных, каждая из которых представляет собой план мероприятий по обеспечению требуемых значений показателей качества. Поэтому при решении задачи (1)–(2) определены значения $Q(t)$ для планов мероприятий $p_j \in \{P\}$, $j = 1, 2, \dots, N$, и с помощью перебора определяется тот план, реализация которого минимизирует $Q(t)$:

$$p_j : \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_{18}(t)\} \rightarrow \{X_1(t) + \delta_1^{(j)}, X_2(t) + \delta_2^{(j)}, \dots, X_{18}(t) + \delta_{18}^{(j)}\},$$

где $X_i(t) < \delta_i^{(j)} < 1 - X_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, 18$, $j = 1, 2, \dots, N$. Величины $\delta_1^{(j)}$, $\delta_2^{(j)}$, ..., $\delta_{18}^{(j)}$ определяются экспертами с учетом специфики технологического процесса сварки. Вычисляя значения целевой функции $Q(t)$ для каждого $p_j \in \{P\}$ на заданном временном отрезке, определим план мероприятий, который позволит осуществить оптимальное управление качеством сварки в РТК.

На рис. 4 представлено сравнение графиков целевой функции $Q(t)$ без осуществления УВ (сплошная линия) и в результате реализации различных планов мероприятий p_1, p_2, \dots, p_6 (пунктирные и штрих-пунктирные линии).

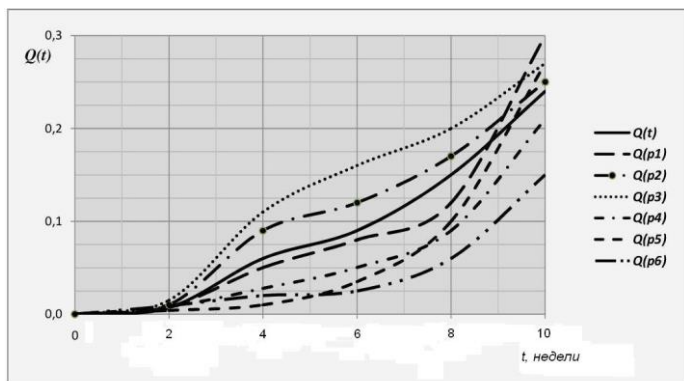


Рис. 4. Сравнение динамики целевой функции $Q(t)$ при отсутствии управляющих воздействий и при реализации планов мероприятий

Как следует из графиков, через 5 недель минимум функции $Q(t)$ достигается при реализации плана мероприятий p_5 , а на отрезке от 5 до 10 недель – при реализации плана p_6 . Мероприятия данных планов, а также значения показателей до и после их реализации (X_i^0 и X_i^* соответственно) показаны в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. План мероприятий p_5

Мероприятия		X_i^0	δ_i	X_i^*
1. Технологам ежемесячно проверять наличие технологической документации на рабочих местах	X_1	0,095	-0,023	0,072
	X_2	0,790	0,061	0,851
	X_3	0,123	-0,046	0,077
	X_4	0,532	-0,141	0,391
2. Оператору проводить контроль состояния сопла горелки после очистки	X_5	0,864	0,032	0,896
	X_6	0,632	0	0,632
	X_7	0,827	0	0,827
	X_8	0,773	0	0,773
3. Программисту проводить мониторинг значений сварочного тока с помощью функции RTMON	X_9	0,276	0	0,276
	X_{10}	0,338	-0,075	0,263
	X_{11}	0,365	-0,153	0,212
4. Отделу кадров принять на работу дополнительно одного оператора	X_{12}	0,194	-0,063	0,131
	X_{13}	0,638	-0,114	0,524
	X_{14}	0,843	0,071	0,914
5. Оператору ежемесячно проводить точную настройку расхода защитного газа и отсекателя	X_{15}	0,776	-0,134	0,642
	X_{16}	0,652	-0,211	0,441
	X_{17}	0,970	0,021	0,991
6. Установить регуляторы давления защитного газа на входе РТК	X_{18}	0,961	0,012	0,973

Как видно из таблицы 4, реализация плана мероприятий p_6 позволяет снизить значение X_1 с 0,095 до 0,08, что означает уменьшение количества забракованных балок с 11 до 8 на 100 единиц продукции, а значение показателя X_4 снизить с 0,532 до 0,398, что эквивалентно уменьшению средней протяженности дефектных сварных швов с 0,75 м до 0,35 м на 1 единицу продукции.

Таблица 4. План мероприятий p_6

Мероприятия		X_i^0	δ_i	X_i^*
1. Оператору проводить промежуточный контроль качества сварного шва	X_1	0,095	-0,015	0,080
	X_2	0,790	0	0,790
	X_3	0,123	-0,078	0,201
2. Цеховому технологу осуществлять периодическую проверку актуальности документации	X_4	0,532	-0,134	0,398
	X_5	0,864	0,085	0,779
	X_6	0,632	0,233	0,865
3. Оператору проводить мониторинг значений сварочного тока по индикаторам источника питания	X_7	0,827	0	0,827
	X_8	0,773	0	0,773
	X_9	0,276	0	0,276
4. Наладчикам и программистам проводить планово-предупредительные работы согласно графику	X_{10}	0,338	0,015	0,353
	X_{11}	0,365	0,003	0,368
	X_{12}	0,194	-0,043	0,151
	X_{13}	0,638	-0,004	0,634
	X_{14}	0,843	0,031	0,874
5. Отделу кадров принять на работу дополнительно одного программиста	X_{15}	0,776	-0,015	0,761
	X_{16}	0,652	0,011	0,663
	X_{17}	0,970	-0,013	0,957
	X_{18}	0,961	0,023	0,984

5. Оперативное управление процессом сварки в РТК с использованием разработанной математической модели

Для реализации математической модели (4) разработан программный комплекс «Rob_QC» (рис. 5), позволяющий осуществлять оперативное управление процессом сварки в РТК.

На рис. 6 приведена структура разработанного программного обеспечения использующего типовой комплекс технических средств управления РТК дуговой сварки для решения задачи (1)–(2), где:

Rob_QC – программный комплекс оперативного управления качеством сварки в РТК: МДУ – модуль решения системы дифференциальных уравнений для показателей качества; ММЦ – модуль вычисления и минимизации целевой функции;

МФМ – модуль выдачи мероприятий, рекомендованных для повышения качества, БД – база данных;

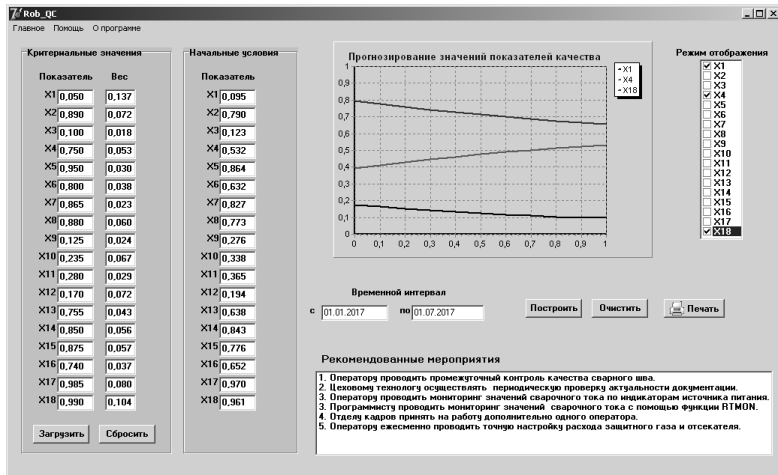


Рис. 5. Интерфейс программного комплекса «Rob_QC»

1 – автоматизированные рабочие места специалистов: АРМ-1 – генерального директора; АРМ-2 – технического директора; АРМ-3 – директора по качеству; АРМ-4 – главного механика; АРМ-5 – главного технолога; АРМ-6 – начальника цеха; АРМ-7 – начальника ОТК; АРМ-8 – оператора;

2 – двигатели управления осями манипулятора: Jt1, Jt2, ..., Jt7 – двигатели 1-й, 2-й, ..., 7-й осей соответственно;

3 – сварочный контур: TPS5000 – источник питания; TS – блок тактильного отслеживания детали; VR1500 – блок подачи сварочной проволоки; FK4000 – блок охлаждения сварочной горелки; AWS-M – датчик удара горелки;

4 – устройства безопасности: ADSR0, ADSR1 – реле управления фотоэлементными барьерами; VE3BL, JE3BL – эмиттеры; VR3BL, JR3BL – ресиверы; ZCK-E21 – концевые выключатели движения колонны манипулятора; ZCK-E65 – концевые выключатели начального положения сварочной горелки; ZCK-E08 – концевые выключатели аварийных дверей; ZCK-J1 – концевые выключатели сближения манипуляторов;

1GA – блок центрального процессора управления контроллером: RS232 I/F – последовательный интерфейс; LAN I/F – интерфейс для подключения к локальной сети; CPU – центральный процессор контроллера С-40;

1HP – блок управления сервоприводами: CPC – модуль управляющего питания двигателей; MPC – модули датчиков положения манипулятора;

1GB – блок управления двигателями осей манипулятора: CPU A – центральный процессор управления двигателями Jt1–Jt3; CPU B – центральный процессор управления двигателями Jt4–Jt6; CPU C – центральный процессор управления двигателем Jt7; FC40 – многофункциональный пульт оператора;

Rob4000 – интерфейс пользователей для связи со сварочным оборудованием.

Процедура оперативного управления процессом сварки в РТК по критерию (1) на основе модели (4) и с использованием программного комплекса «Rob_QC» приведена в виде информационно-логической схемы (рис. 7).

Здесь 1 – сбор данных по бракованным изделиям; 2 – сбор данных о численности персонала; 3 – запись информации в БД; 4 – сбор данных о реализованных мероприятиях за месяц; 5 – мероприятия выполняются?; 6 – поиск причин невыполнения мероприятий; 7 – устранение причин невыполнения, корректировка плана; 8 – поощрение персонала; 9 – анализ причинно-следственных связей; 10 – извлечение из БД заданных показателей качества; 11 – отклонение фактических показателей от заданных меньше заданного значения?; 12 – корректировка функциональных зависимостей; 13 – занесение в БД новых значений показателей; 14 – вычисление фактических показателей качества за год; 15 – достигнут требуемый уровень качества?; 16 – анализ причин отклонения; 17 – корректировка математической модели (4); 18 – внесение в БД изменений математической модели; 19 – поощрение персонала; 20 – вычисление значений показателей качества на следующий период планирования.

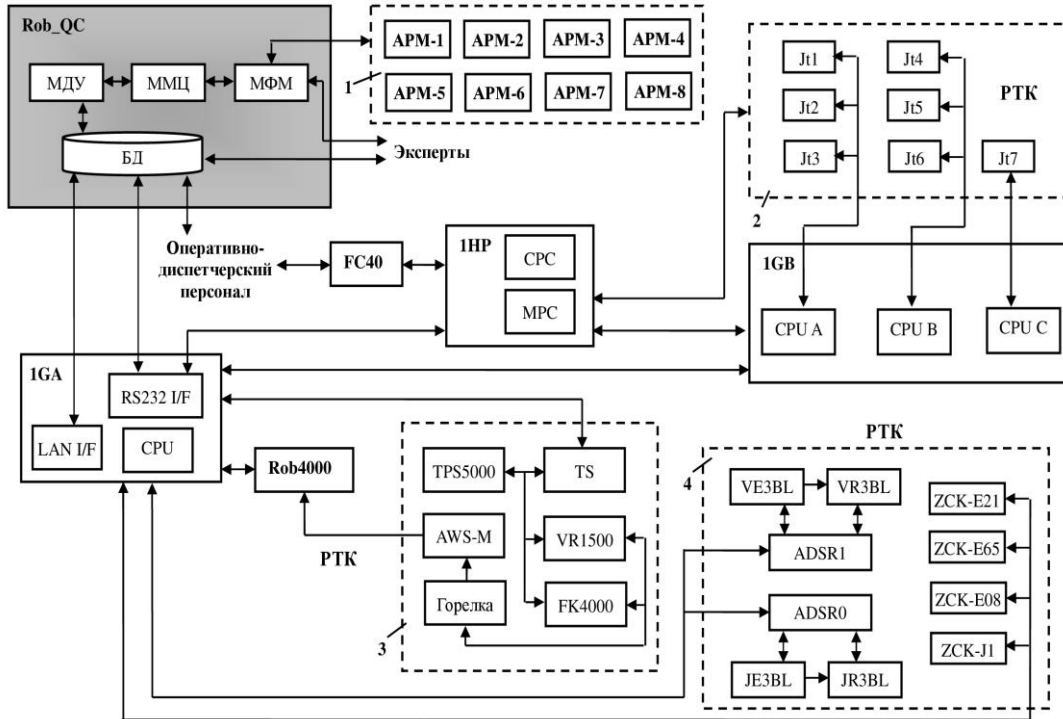


Рис. 6. Структура комплекса технических средств управления PTK дуговой сварки

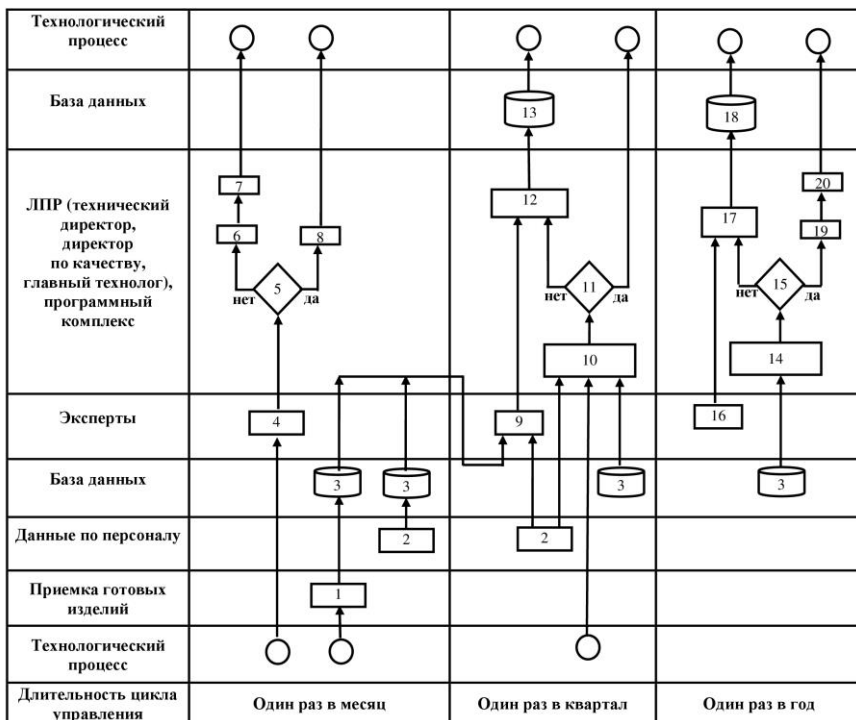


Рис. 7. Информационно-логическая схема решения задачи оперативного управления процессом сварки в РТК

На начальном этапе решается система дифференциальных уравнений (4) для определения расчетных значений показателей качества и вычисления целевой функция $Q(t)$. Далее определяется план мероприятий для минимизации целевой функции.

На отрезке времени «Один раз в месяц» проводится проверка выполнения разработанных мероприятий. В случае невыполнения проводится анализ и устранение причин, при необходимости план мероприятий корректируется и заносится в БД.

На отрезке времени «Один раз в квартал» проводится анализ неисправностей РТК за квартал, сбор данных о численности персонала и данных о бракованных изделиях. На основе этих данных вычисляются фактические показатели качества. В слу-

чае отклонения фактических показателей от заданных проводится анализ и корректировка функциональных зависимостей $f_1(X_i), \dots, f_{36}(X_i)$. Скорректированные зависимости заносятся в БД.

На отрезке времени «Один раз в год» проводится вычисление годовых фактических показателей качества, которые сравниваются с заданными. При достижении требуемого уровня качества осуществляется поощрение персонала и осуществляется расчет показателей качества на очередной период.

6. Заключение

Предложенные модели и алгоритмы управления процессом сварки роботизированными технологическими комплексами обеспечивают оптимизацию процесса дуговой сварки по критерию качества производимой продукции.

Разработанное математическое обеспечение, реализующее эти модели и алгоритмы, позволяет осуществлять оценку показателей качества на различных временных отрезках и осуществлять оперативное управление процессом дуговой сварки в РТК в соответствии с предложенным критерием.

В настоящее время разработанные модели и алгоритмы проходят апробацию в составе комплекса технических средств управления РТК для сварки на ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс).

Литература

1. БАБКИН А.С. *Методы решения задач в технологических САПР сварочного производства: Обзор* // Сварочное производство. – 1996. – №4. – С. 20–23.
2. ВОРОБЬЁВ Е.И., ХАТУНЦЕВ Д.И. *Прямая и обратная задача кинематической точности промышленных роботов* // Автоматизация. Современные технологии. – 2014. – №9. – С. 7–9.

3. ИВАНОВ В.П., ЛИНЬКОВ В.С., ЧЕРНЕЦКИЙ Р.И. *Специализированная автоматика для роботизированных сварочных комплексов // Автоматизация в промышленности.* – 2015. – №5. – С. 116–121.
4. КЕРИМЖАНОВА М.Ф. *Анализ основных технических параметров промышленных роботов // Автоматизация. Современные технологии.* – 2007. – №7. – С. 13–15.
5. КУШНИКОВ В.А., ЩЕРБАКОВ М.А. *Задачи, модели и алгоритмы системы управления производством листового стекла // Управление большими системами: сборник трудов.* – 2014. – Вып. 48. – С. 198–224.
6. РЕЗЧИКОВ А.Ф., КУШНИКОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А., ФОМИНЫХ Д.С., БОГОМОЛОВ А.С., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2017. – №5. – С. 328–332.
7. РЕЗЧИКОВ А.Ф., КУШНИКОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А., ФОМИНЫХ Д.С., БОГОМОЛОВ А.С., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Управление процессом сварки в роботизированных технологических комплексах по критерию качества продукции в условиях риска возникновения нестабильных состояний // Системы управления и информационные технологии.* – 2017. – №3(69). – С. 65–72.
8. РЕЗЧИКОВ А.Ф., КУШНИКОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А., ЦЕСАРСКИЙ Л.Г., БОГОМОЛОВ А.С., ФИЛИМОНЮК Л.Ю., АДАМОВИЧ К.Ю. *Анализ и прогнозирование характеристик безопасности авиационных транспортных систем на основе уравнений системной динамики// Управление большими системами: сборник трудов.* – 2016. – Вып. 64. – С. 27–48.
9. ФОРРЕСТЕР ДЖ. *Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика).* – М.: Изд-во «Прогресс», 1971. – 325 с.

10. *Человек. Машина. Среда* / РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. / Под. ред. А.Ф. Резчикова. – Саратов: ООО «Издательский центр «Наука»», 2013. – 195 с.
11. ЯНДЫБАЕВА Н.В., КУШНИКОВ В.А. *Математическая модель для прогнозирования показателей аккредитации вуза* // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 41. – С. 314–343.
12. ЯНДЫБАЕВА Н.В., КУШНИКОВ В.А. *Управление образовательным процессом вуза на основе модели Форрестера* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – №2(55). – С. 172–176.

CONTROL OF ARC WELDING PROCESS IN ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES BASED ON SYSTEM DYNAMICS MODEL

Alexander Rezchikov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, professor, corresponding member of RAS (iptmuran@san.ru).

Vadim Kushnikov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, professor, (iptmuran@san.ru).

Vladimir Ivaschenko, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, professor, (iptmuran@san.ru).

Dmitry Fominykh, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science (dm_fominyh@mail.ru).

Alexei Bogomolov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, assistant professor, (iptmuran@san.ru).

Leonid Filimonyuk, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, (iptmuran@san.ru).

Abstract: The article solves the problem of controlling the welding process via robotic technological complexes according to the quality criterion of the production. A mathematical model and an algorithm for solving it have been developed. The solution of the problem is performed using the system dynamics model, which allows to proceed to a system of nonlinear differential equations for phase variables (system levels). As the system levels used the main indicators of production quality. Factors affecting the growth and decrease of indicators are described. The graph describing the cause-effect relations between the indicators is given. By approximating the statistical data, functional dependencies between these indicators are determined. The description of the software for the implementation of the developed algorithm as part of a complex of technical controls for a robotic technological complex is given. A procedure has been developed for the operational control of the welding process in robotic complexes according to the proposed criterion at various time intervals in the form of an information-logic scheme. The introduction of the developed mathematical software will allow to increase the quality of arc welding in robotic complexes.

Keywords: robotic technological complex, technological process, system dynamics, level of quality, control of weld process, mathematical model.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Н.Н. Бахтадзе.*

*Поступила в редакцию 28.02.2018.
Опубликована 31.01.2018.*