

А. Ф. Резчиков, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, **В. А. Кушников**, д-р техн. наук, проф.,
В. А. Иващенко, д-р техн. наук, ст. научн. сотр., **Д. С. Фоминых**, канд. техн. наук,
А. С. Богомолов, канд. физ.-мат. наук, доцент, **Л. Ю. Филимонюк**, канд. техн. наук, iptmuran@san.ru,
 Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов,
 Саратовский национальный исследовательский университет имени Н. Г. Чернышевского,
 Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах¹

Разработаны математические модели и алгоритмы минимизации ущерба от изготовления некачественной продукции в сварочных роботизированных технологических комплексах. Предложены программно-технические средства реализации данных моделей и алгоритмов. Их внедрение позволит снизить ущерб от простоев сварочного оборудования и повысить стабильность технологического процесса сварки.

Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс, минимизация ущерба от изготовления некачественной продукции, математическая модель, алгоритм, сварка

Введение

Важной задачей, стоящей перед отечественными машиностроительными предприятиями, является сокращение потерь от выпуска некачественной продукции, обусловленных выполнением сварочных операций. Одним из эффективных способов решения данной задачи является автоматизация производственного процесса за счет внедрения роботизированных технологических комплексов (РТК) дуговой сварки.

Процесс сварки в РТК характеризуется большим числом контролируемых параметров и существенной ролью оперативно-диспетчерского и ремонтного персонала.

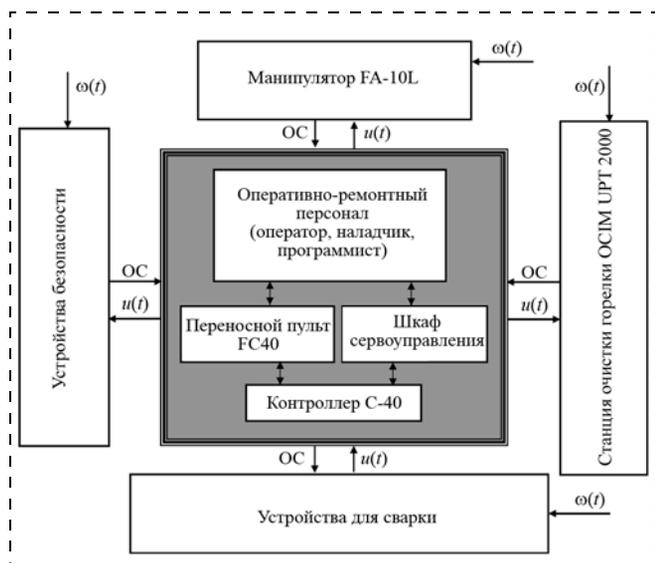


Рис. 1. Схема технологического процесса дуговой сварки в РТК: $u(t)$ — управляющие воздействия (УВ); ОС — обратная связь; $\omega(t)$ — возмущения

РТК дуговой сварки состоит из синхронно работающих манипуляторов, снабженных сварочным оборудованием (источник питания, блок подачи проволоки, блок охлаждения, сварочная горелка и др.). Комплекс снабжен устройствами безопасности (ограждение, кнопки аварийной остановки, фотоэлементные барьеры). Управление и оперативный контроль работы комплекса осуществляется оператором посредством переносного пульта, связанного с контроллером. Схема технологического процесса автоматической сварки как объекта управления на примере роботов Kawasaki со сварочным оборудованием Fronius представлена на рис. 1.

В настоящее время разработаны и прошли проверку на практике различные системы для оптимизации работы РТК. Анализ их функционального назначения показывает, что основное внимание в них уделяется оптимизации работы манипуляторов или сварочного оборудования [1–4]. При этом в используемых РТК, как правило, отсутствует решение задачи минимизации ущерба от изготовления некачественной продукции.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность разработки предложенного подхода к управлению технологическим процессом автоматической сварки в РТК, в основу которого положены новые математические модели и алгоритмы, позволяющие минимизировать ущерб от изготовления некачественной продукции при сварке изделий РТК.

Математические модели и алгоритмы

Допустим, что на основании анализа опыта эксплуатации сварочных роботизированных комплексов разработан подробный план действий, при реализации которого будет минимизирован ущерб от нарушений в сварочных РТК. Возможность разработки такого плана подтверждается практикой ус-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 16-01-00536.

пешного функционирования РТК на многих отечественных предприятиях.

С учетом данного допущения задача управления РТК в целях минимизации ущерба от нарушения технологического процесса сводится к проверке выполнимости данного плана на различных временных интервалах и реализации мероприятий по устранению нарушений.

На основе анализа причинно-следственных связей между характеристиками процесса сварки и изучения опыта работы персонала, эксплуатирующего РТК на ОАО "Трансмаш" (г. Энгельс), разработан типовой план мероприятий по минимизации ущерба от изготовления некачественной продукции при сварке изделий РТК. Граф этого плана, состоящий из 197 вершин, имеет вид дерева, в котором вершины — мероприятия плана, а дуги определяют их взаимосвязь и последовательность реализации. Фрагмент данного плана изображен на рис. 2.

На выполнимость мероприятий данного плана влияют условия, учитывающие специфику технологического процесса. Эти условия имеют вид продукций:

Условие g_j :

$$\text{ЕСЛИ } \langle B_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) R_1 B_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) R_2 \dots R_j \dots R_{k-1} B_k(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \rangle,$$

ТО \langle выполнение мероприятия Q_p возможно/невозможно \rangle . (2)

Здесь $B_j(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $j = 1, 2, \dots, k$, — условия выполнения соответствующих мероприятий; R_j , $j = 1, 2, \dots, k - 1$, — множество логических операций "И", "ИЛИ", "НЕ"; $Q_p \in \{Q_0, Q_1, \dots, Q_{39}\}$ — мероприятия плана. Таким образом, решение задачи сводится к периодической проверке выполнимости мероприятий плана Q_0 при заданных условиях g_j .

Рассмотрим алгоритм проверки выполнимости плана мероприятий Q_0 на примере процесса дуговой сварки в РТК с манипуляторами Kawasaki FA10L и источниками питания Fronius TPS5000. Исходя из опыта эксплуатации данного оборудования сформировано семь основных условий, влияющих на выполнение мероприятий плана Q_0 (рис. 2). В левой части продукции учтены основные характеристики технологического процесса (см. таблицу).

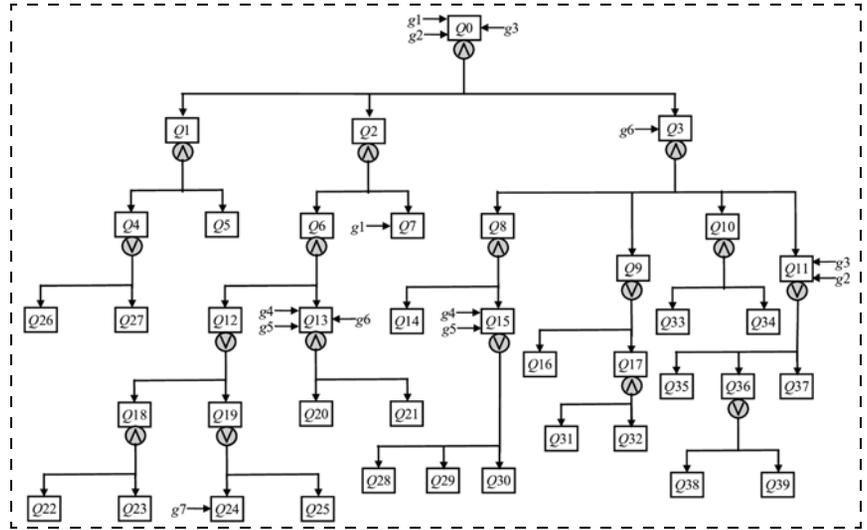


Рис. 2. Фрагмент графа плана мероприятий по снижению выпуска некачественной продукции при сварке изделий в РТК:

Q_0 — повышение качества изделий, свариваемых в РТК; Q_1 — контроль ОТК качества сварки; Q_2 — контроль оператором качества сварки в ходе технологического процесса; Q_3 — обеспечение корректной работы программы в ходе сварки; Q_4 — наличие актуальной технологической документации на рабочих местах; Q_5 — осуществление контроля качества сваренного изделия; Q_6 — промежуточный контроль со стороны оператора качества сварочного шва; Q_7 — поддержка необходимого давления защитного газа на входе РТК; Q_8 — корректная работа системы тактильного отклонения; Q_9 — обеспечение стабильности тока на двигателе подающего блока; Q_{10} — контроль работы программы очистки; Q_{11} — соблюдение режимов сварки в реальном времени; Q_{12} — контроль оператором очистки сварочной горелки; Q_{13} — обеспечение стабильности сварочной дуги; Q_{14} , Q_{16} — визуальный контроль качества сварного шва; Q_{15} — обеспечение минимального отклонения сварочного тока от номинального; Q_{17} — мониторинг значений тока двигателя подающего механизма на индикаторах источника питания; Q_{18} — контроль оператором сопла горелки после очистки; Q_{19} — контроль оператором работы фрезы станции очистки; Q_{20} — визуальный контроль сварочной дуги на наличие искр, брызг и др.; Q_{21} — контроль оператором стабильности параметров сварки на индикаторах источника питания; Q_{22} — проведение очистки вручную в случае необходимости; Q_{23} — вызов наладчиков при недостаточной очистке сварочной горелки; Q_{24} — поддержка необходимого давления сжатого воздуха на станции очистки; Q_{25} — вызов наладчиков при недостаточном давлении сжатого воздуха на станции очистки; Q_{26} — периодическая проверка документации цеховым технологом; Q_{27} — контроль актуальности документации мастерами; Q_{28} — мониторинг значений сварочного тока с помощью функции RTMON; Q_{29} — мониторинг значений сварочного тока по индикаторам источника питания; Q_{30} — контроль порогового значения отклонений сварочного тока в функции RTPM; Q_{31} — выбор в меню источника питания индикации тока двигателя подающего механизма; Q_{32} — согласно технологической документации в случае отклонения тока двигателя более чем на 10 % остановить процесс сварки; Q_{33} — визуальный контроль сопла горелки после очистки; Q_{34} — поддержка заданного уровня антипригарной жидкости; Q_{35} — установка скорости сварки согласно технологической документации; Q_{36} — обеспечение заданного напряжения сварочной дуги; Q_{37} — контроль горизонтального и вертикального смещения сварочной горелки; Q_{38} — согласно технологической документации в случае колебания напряжения более чем на 10 % в импульсном режиме остановить процесс сварки; Q_{39} — согласно технологической документации в случае превышения напряжения более чем на 5 % в линейном режиме остановить процесс сварки; g_1, \dots, g_7 — условия, влияющие на выполнение мероприятий $Q_0, Q_3, Q_7, Q_{11}, Q_{13}, Q_{15}, Q_{24}$; Λ — символ конъюнкции; \vee — символ дизъюнкции

Технологические характеристики процесса дуговой сварки в РТК

Обозначение	Наименование параметра
I	Текущее значение сварочного тока, А
$I_{\text{ном}}$	Номинальное значение сварочного тока, А
ε_I	Пороговое отклонение тока от номинального, А
I_w	Текущее значение тока на двигателе подающего механизма, А
I_w^*	Пороговое значение тока на двигателе подающего механизма, А
$ErrorCodeC$	Значение ошибки контроллера
$ErrorCodePS$	Значение ошибки источника питания
P_B	Давление сжатого воздуха в пневматическом контуре, МПа
P_Γ	Давление защитного газа на входе, МПа

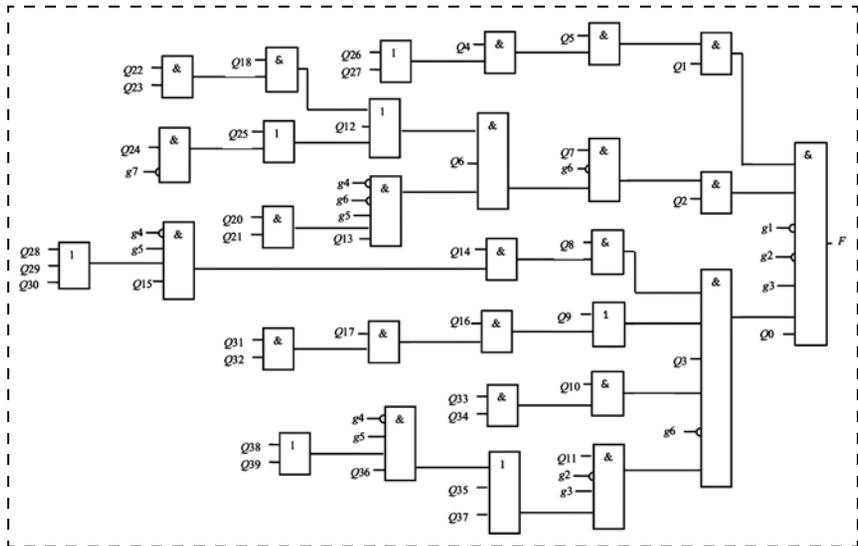


Рис. 3. Структурная схема дискретного устройства для оперативной проверки выполнения плана мероприятий

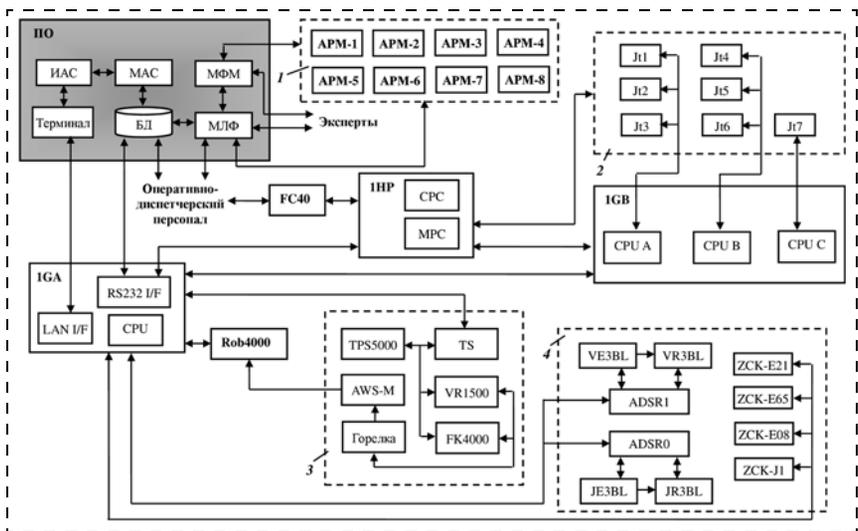


Рис. 4. Структура комплекса технических средств управления процессом сварки в РТК: ПО — программное обеспечение для управления процессом в РТК дуговой сварки; терминал — интегрированный интерфейс RSVIEW32, ИАС — модуль идентификации аварийной ситуации, MAC — модуль выдачи рекомендаций по устранению аварийной ситуации, БД — база данных, МФМ — модуль формирования мероприятий плана по снижению ущерба от некачественной продукции, МЛФ — модуль вычисления логической функции для проверки выполнения плана; 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: ТПС5000 — 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; ИГА — 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; ИП — блок управления сервоприводами: CPC — модуль управляющего питания двигателей, MPC — модули датчиков положения манипулятора; ИГБ — блок управления двигателями осей манипулятора: CPU А — центральный процессор управления двигателями Jt1—Jt3, CPU В — центральный процессор управления двигателями Jt4—Jt6, CPU С — центральный процессор управления двигателем Jt7; FC40 — многофункциональный пульт оператора; Rob4000 — интерфейс пользователей для связи со сварочным оборудованием

Ниже перечислены основные условия, влияющие на выполнение мероприятий плана Q0.

Условие g₁: ЕСЛИ (произошла утечка защитного газа) ИЛИ (P_г > 5,5 МПа), ТО (выполнение мероприятий Q0, Q7 невозможно).

Условие g₂: ЕСЛИ (I_w > I_w^{*}) ИЛИ (ErrorCodePS = ERR{056}), ТО (выполнение мероприятий Q0, Q11 невозможно).

Условие g₃: ЕСЛИ (g₂ = TRUE) И (ErrorCodeC = CycleStopped) И (выполнена герметизация газового контура), ТО (выполнение мероприятий Q0, Q11 возможно).

Условие g₄: ЕСЛИ (ErrorCodeC = -1802 ИЛИ (ErrorCodePS = ERR{052}) ИЛИ (|I - I_{НОМ}| ≥ ε_I), ТО (выполнение мероприятий Q13, Q15 невозможно).

Условие g₅: ЕСЛИ (g₄ = TRUE) И (ErrorCodeC = CycleStopped), ТО (выполнение мероприятий Q13, Q15 возможно).

Условие g₆: ЕСЛИ (ворота в цех открыты) И (ErrorCodeC ≠ CycleStopped), ТО (выполнение мероприятий Q3, Q13 невозможно).

Условие g₇: ЕСЛИ (P_в ≤ 5 МПа), ТО (выполнение мероприятия Q24 невозможно).

Системе продукции (2) и графу мероприятий (рис. 2) поставлена в соответствие логическая функция

$$F(Q1, Q2, \dots, Q39, g_1, g_2, \dots, g_7) = Q5 \wedge Q7 \wedge Q14 \wedge (Q26 \vee Q27) \wedge Q20 \wedge Q21 \wedge (Q22 \wedge Q23 \vee Q24 \wedge g_7 \vee Q25) \wedge (Q28 \vee Q29 \vee Q30) \wedge (Q16 \vee Q31 \wedge Q32) \wedge Q33 \wedge Q34 \wedge (Q35 \vee Q38 \wedge g_5 \vee Q39 \wedge g_5 \vee Q37) \wedge g_1 \wedge g_2 \wedge g_3 \wedge g_4 \wedge g_6$$

$$F(Q1, Q2, \dots, Q39, g_1, g_2, \dots, g_7) = \begin{cases} 1, & \text{если план выполним;} \\ 0, & \text{если план невыполним.} \end{cases}$$

На рис. 3 приведена структурная схема дискретного устройства, построенного по данной булевой функции, для быстрой проверки выполнения плана Q0.

Задавая различные значения аргументов этой функции (выполнение или невыполнение мероприятий

Q_1, \dots, Q_{39} и условий g_1, \dots, g_7), в любой момент времени можно оперативно проверить возможность выполнения плана мероприятий в различных производственных ситуациях и, следовательно, решить поставленную задачу.

Структура и состав комплекса технических средств для реализации предложенных моделей и алгоритмов

На рис. 4 приведена структура комплекса технических средств для реализации представленных выше моделей и алгоритмов.

Разработанное математическое обеспечение в составе описанного комплекса технических средств позволяет осуществить оперативное управление процессом сварки в РТК по критерию, характеризующему ущерб от нарушений качества продукции.

Процедура решения задачи управления процессом сварки в РТК дуговой сварки представлена на информационно-логической схеме (рис. 5).

Как следует из информационно-логической схемы, на временном отрезке "Один раз в час" выполняются анализ состояния РТК и сбор информации об отказах и отклонениях качества сваренных изделий, информация заносится в БД.

На временном отрезке "Один раз в смену" проводится анализ причин возникновения отказов РТК. Информация о причинах отказов и способах их устранения выдается диспетчерскому персоналу и заносится в БД. В случае необходимости корректируются мероприятия плана по снижению выпуска некачественной продукции, выдаются рекомендации оперативному персоналу, реализуются управляющие воздействия, которые заносятся в БД.

На временном отрезке "Один раз в неделю" выполняется сбор информации об отказах комплекса технических средств, отклонениях качества продукции и выполненных мероприятиях плана по снижению ущерба от изготовления некачественной продукции. Проверка выполнимости плана мероприятий проводится с помощью логической функции. В случае его невыполнения выявляются причины и выдаются рекомендации по их устранению.

На временном отрезке "Один раз в месяц" на основе анализа накопленной информации об управляющих воздействиях, реализованных в течение месяца, планово-экономическим отделом предприятия осуществляется оценка экономического эффекта уп-

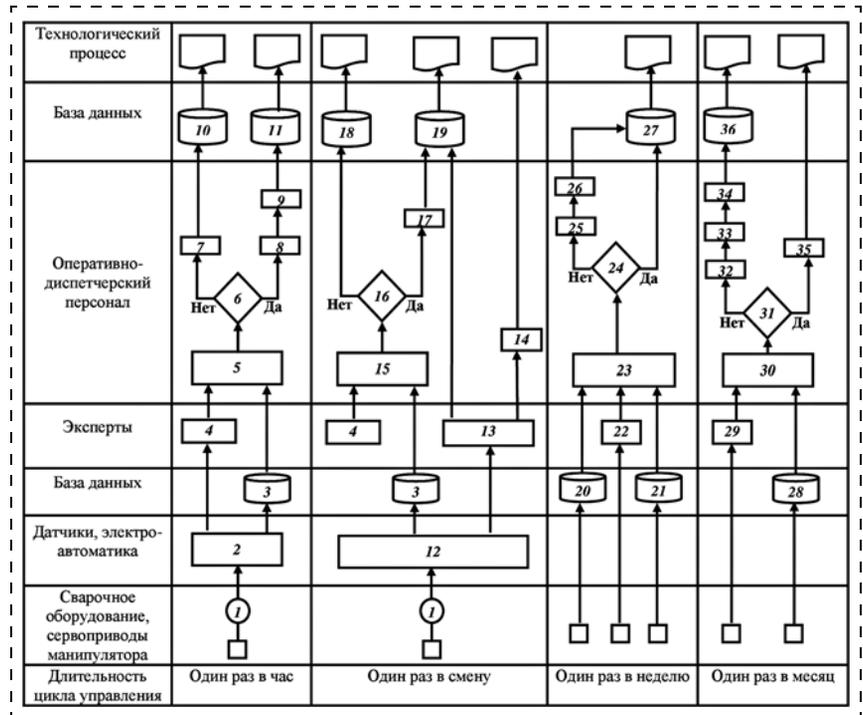


Рис. 5 Информационно-логическая схема решения задачи управления процессом дуговой сварки в РТК:

1 — процесс сварки; 2 — сбор информации о ходе процесса сварки; 3 — запись информации об отклонениях качества сварки в БД; 4 — оценка ситуации при отклонении параметров сварки от номинальных значений; 5 — идентификация текущей ситуации; 6 — ситуация аварийная?; 7 — сообщение о штатной ситуации оператору; 8 — сообщение о возникновении аварийной ситуации оператору; 9 — принятие решения по устранению аварийной ситуации; 10 — занесение информации о штатной ситуации в БД; 11 — занесение информации об аварийной ситуации в БД; 12 — сбор информации об отказах комплекса технических средств; 13 — корректировка плана мероприятий по снижению ущерба от некачественной продукции; 14 — выдача рекомендаций персоналу в соответствии с планом мероприятий; 15 — анализ состояния РТК; 16 — произошел отказ, учтенный в математической модели?; 17 — сообщение ремонтному персоналу и оператору об отказах комплекса технических средств; 18 — занесение информации об отказах в БД; 19 — занесение в БД информации об откорректированной модели; 20 — извлечение из БД информации об отказах за неделю; 21 — извлечение информации из БД о выпуске некачественной продукции за неделю; 22 — сбор экспертной информации об отклонениях качества сварки; 23 — формирование логической функции для проверки выполнения плана мероприятий; 24 — план мероприятий выполнен?; 25 — поиск по графу плана мероприятий причин его невыполнения; 26 — выдача рекомендаций по устранению причин невыполнения плана мероприятий; 27 — занесение в БД информации о результатах минимизации ущерба от выпуска некачественной продукции; 28 — сбор информации о мероприятиях за месяц; 29 — экспертная оценка экономического эффекта от реализации УВ; 30 — анализ выполненных мероприятий оперативным персоналом; 31 — достигнут ли ожидаемый эффект?; 32 — анализ причин неэффективности; 33 — корректировка плана мероприятий по снижению ущерба от некачественной продукции; 34 — утверждение скорректированного плана мероприятий; 35 — премирование персонала; 36 — занесение в БД информации о скорректированном плане мероприятий

равления процессом сварки. При невозможности достижения ожидаемого уровня экономического эффекта проводятся необходимые изменения в плане мероприятий и коррекция параметров математической модели.

Заключение

Предложенные модели и алгоритмы позволяют обеспечить минимизацию ущерба от изготовления некачественной продукции в роботизированных технологических комплексах. Минимизация ущерба достигается за счет разработки, реализации и проверки выполнимости плана мероприятий по сни-

жению выпуска некачественной продукции при сварке изделий в РТК.

Внедрение данных моделей и алгоритмов наряду со снижением ущерба позволит повысить стабильность технологического процесса сварки.

В настоящее время разработанная система управления процессом сварки проходит апробацию на ОАО "Трансмаш" (г. Энгельс).

Список литературы

1. **Бабкин А. С.** Методы решения задач в технологических САПР сварочного производства: Обзор // Сварочное производство. 1996. № 4. С. 20—23.
2. **Иванов В. П., Линьков В. С., Чернецкий Р. И.** Специализированная автоматика для роботизированных сварочных комплексов // Автоматизация в промышленности. 2015. № 5. С. 116—121.
3. **Нгуен Д. К., Лубенко В. Н.** Особенности роботизации сварочного производства в судостроении // Вестник АГТУ. 2008. № 2, С. 149—155.
4. **Паршева Е. А.** Децентрализованное робастное управление многозвенным манипулятором сварочного производства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 29—35.

5. **Аветисян Ю. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Родичев В. А.** Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43—47.
6. **Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Фоминых Д. С., Санькова А. Б.** Модели и алгоритмы системы оперативного управления процессом формования листового стекла // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 12. С. 16—24.
7. **Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Цвиркун А. Д.** Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 168—175.
8. **Резчиков А. Ф., Шрай Ю. К., Кушников В. А., Донин С. Г.** Оперативная идентификация и управление режимами эксплуатации энергосистем предприятия // Приборы и системы управления. 1994. № 5. С. 12—15.
9. **Саютин А. В., Кушников В. А.** Особенности применения метода анализа главных компонент для обеспечения эффективной работы энергосбытовой организации // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Том 1. № 1 (37). С. 99—104.
10. **Шлычков Е. И., Фоминых Д. С., Резчиков А. Ф., Кушников В. А.** Автоматизированная система ситуационного управления процессом формования листового стекла // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 8. С. 3—11.
11. **Щербаков М. А., Кушников В. А.** Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 2 (55). Ред. 1. С. 196—199.

Minimization of the Damage Caused by Breakdowns of the Technological Processes in the Robotic Welding Technological Complexes

A. F. Rezchikov, iptmuran@san.ru, **V. A. Kushnikov**, iptmuran@san.ru,
V. A. Ivaschenko, iptmuran@san.ru, **D. S. Fominykh**, dm_fominyh@mail.ru✉,
A. S. Bogomolov, iptmuran@san.ru, **L. Yu. Filimonyuk**, iptmuran@san.ru,
Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, 410028, Russian Federation

Corresponding author: **Fominykh Dmitrii S.**, Ph. D.,
Institute of Precision Mechanics and Control of RAS,
Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: dm_fominyh@mail.ru

Received on June 15, 2016

Accepted on July 21, 2016

The article describes the problems, mathematical models and algorithms for control of the automatic welding technologic processes in the robotic complexes. The problem of a rational control of the process is solved by the criterion used for minimization of the damage caused to the quality by breakdowns. Since a solution by the methods of variations calculus is problematic, the problem of the criterion minimization boils down to development and verification of implementation of a detailed complex action plan for a decrease of the damage due to breakdowns in the technological processes. The action plan was developed based on the causality between the process parameters and learning of the experience by the dispatching personnel. The plan is presented as a directed graph, in which vertices are actions of the plan, and arcs define their relationship and sequence of implementation. The conditions affecting the technological process and implementation of the plan of actions are presented in the form of a production model. For verification of the plan's implementation a logic function was developed in accordance with the graph of the action plan and conditions. By setting different values of the arguments of this function at any time, it is possible to check quickly a possibility of the plan's implementation. The article presents an algorithm for solving of the assignment task at different time intervals by an information-logical scheme. Introduction of the developed models and algorithms in the industrial enterprises using a robotic welding will reduce the damage caused by the defective products.

Keywords: robotic complex, technological process, mathematical model, algorithm, criterion, damage to quality, graph model, action plan

Acknowledgements: This work was supported by RFBR, project 16-01-00536

For citation:

Rezhnikov A. F., Kushnikov V. A., Ivaschenko V. A., Fominykh D. S., Bogomolov A. S., Filimonyuk L. Yu. Minimization of the Damage

Caused by Breakdowns of the Technological Processes in the Robotic Welding Technological Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 328—332.

DOI: 10.17587/mau.18.328-332

References

1. Babkin A. S. *Metody reshenija zadach v tehnologicheskikh SAPR svarochnogo proizvodstva: Obzor* (Methods for solving problems in the CAD technology of welding production: Review), *Svarochnoe Proizvodstvo*, 1996, no. 4, pp. 20–23 (in Russian).
2. Ivanov V. P., Lin'kov V. S., Chernenkiy R. I. *Specializirovannaja avtomatika dlja robotizirovannykh svarochnykh kompleksov* (Specialized equipment for robotized welding complexes), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2015, no. 5, pp. 116–121 (in Russian).
3. Nguen D. K., Lubenko V. N. *Osobennosti robotizacii svarochnogo proizvodstva v sudostroenii* (Features of robotics welding production in shipbuilding), *Vestnik AGTU*, 2008, no. 2, pp. 149–155 (in Russian).
4. Parsheva E. A. *Decentralizovannoe robastnoe upravlenie mnogozvennym manipulatorom svarochnogo proizvodstva* (Decentralized robust control of multilink manipulator for welding production), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2010, no. 2, pp. 29–35 (in Russian).
5. Avetisjan Yu. A., Kushnikov V. A., Rezchikov A. F., Rodichev V. A. *Matematicheskie modeli i algoritmy operativnogo upravlenija processami likvidacii chrezvychajnykh situacij* (Mathematical models and algorithms for operational process control of emergency response), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie.*, 2009, no. 11, pp. 43–47 (in Russian).
6. Kushnikov V. A., Rezchikov A. F., Fominyh D. S., San'kova A. B. *Modeli i algoritmy sistemy operativnogo upravlenija processom formovanija listovogo stekla* (Models and algorithms for operational control system of forming flat glass process), *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii*, 2007, no.12, pp. 16–24 (in Russian).
7. Kushnikov V. A., Rezchikov A. F., Cvirkun A. D. *Upravlenie v cheloveko-mashinnyh sistemah s avtomatizirovannoj proceduroj korekcii celej* (Control of human-machine systems with automated procedure of purposes correction), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1998, no. 7, pp. 168–175 (in Russian).
8. Rezchikov A. F., Shraj Yu. K., Kushnikov V. A., Donin S. G. *Operativnaja identifikacija i upravlenie rezhimami eksploatacii energosistem predprijatija* (Operational identification and control of operation of power systems mode of enterprise), *Pribory i Sistemy Upravlenija*, 1994, no. 5, pp. 12–15 (in Russian).
9. Sajutin A. V., Kushnikov V. A. *Osobennosti primeneniya metoda analiza glavnykh komponent dlja obespechenija effektivnoj raboty energosbytovoj organizacii* (Features of the application of the principal component analysis method to ensure the efficient operation of power sales organization), *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta*, 2009, vol. 1, no. 1 (37), pp. 99–104 (in Russian).
10. Shlychikov E. I., Fominyh D. S., Kushnikov V. A., Rezchikov A. F. *Avtomatizirovannaja sistema situacionnogo upravlenija processom formovanija listovogo stekla* (Automated system of situational control of flat glass molding process), *Avtomatizacija i Sovremennye Tehnologii*, 2006, no. 8, pp. 3–11 (in Russian).
11. Shcherbakov M. A., Kushnikov V. A. *Modeli i algoritmy sistemy upravlenija avarijnymi situacijami pri proizvodstve stekla* (Models and algorithms of emergency control system in the production of glass), *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta*, 2011, no. 2 (55), Ed. 1, pp. 196–199 (in Russian).

УДК 681.513 + 004.94

DOI: 10.17587/mau.18.333-340

И. А. Рыбин, аспирант, intiret@gmail.com, **В. Г. Рубанов**, д-р техн. наук, проф., rubanov@intbel.ru, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Математическая модель системы управления мобильного транспортного средства*

Представлена математическая модель системы управления движением транспортного средства, имеющего шасси с двумя независимыми ведущими колесами. Модель, учитывающая положение колесного мобильного средства относительно заданной трассы, построена с использованием аппарата передаточных функций, что позволяет применять методы как классической, так и современной теории управления для синтеза устройств управления.

Ключевые слова: мобильный робот, транспортное средство, система управления, модель, передаточная функция, траектория движения

Введение

Одной из областей применения мобильных роботов являются транспортно-складские операции на производстве, в которых требуется организовать бесперебойную доставку материалов, инструментов, заготовок к обрабатывающим станкам и своевременную отгрузку готовой продукции на склад. Использование средств навигации, автоматизации и управления позволяет создавать автоматически управляемые транспортные средства (AGV — Automated Guided Vehicle) [1], интеграция которых в систему управления предприятием позволяет сократить время производства, снизить себестоимость продукции, исключить человеческий фактор и участие человека на опасных участках, обеспечить гибкость при переходе на другие виды продукции.

Среди многообразных видов AGV-средств распространены колесные робокары — предназначенные для перевозки грузов роботизированные тележки, шасси которых может иметь различную конфигурацию. Классификация типов шасси приведена в работе [2], где также рассматриваются способы задания трассы движения мобильных роботов, средства их очувствления и приведения в движение.

При разработке систем управления транспортными средствами следует учитывать множество факторов, влияющих на их работу. Математическое и, как следствие, компьютерное моделирование позволяет осуществить анализ системы управления, а также синтез управляющего устройства без необходимости проведения дорогостоящих экспериментов с физическим объектом. Существует большое число моделей транспортных средств, каждая из которых строится на некоторых предположениях и, соответственно, имеет свои преимущества и недостатки.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта N 14-41-08044 "p_офи_м".