

## Опыт построения робототехнического комплекса укладки масложировой продукции

Е.В. Сытов (АО «Управляющая компания ЭФКО»),

С.А. Воротников (МГУ им. Н.Э. Баумана),

М.А. Резницкий (АО «Управляющая компания ЭФКО»)

Представлен робототехнический комплекс (РТК), осуществляющий укладку готовой масложировой продукции (МЖП) в короба на поддоны с использованием робота-паллетайзера и конвейерного оборудования. Комплекс позволяет освободить человека от тяжелого труда, повысить качество укладки, снизить ошибки связанные с человеческим фактором. Алгоритм, управляющий работой РТК, реализован с использованием сети Петри и конечных автоматов. Приведена схема РТК и структура его системы управления. Моделирование работы паллетайзера для проверки работоспособности предложенного решения выполнено в среде Fanuc RoboGuide. Показаны практические результаты реализации РТК на производстве компании ОАО «ЭФКО».

Ключевые слова: паллетирование коробов, робототехнический комплекс, робот-паллетайзер, сети Петри, конечные автоматы, моделирование.

### Введение

Группа компаний «ЭФКО» была основана в 1994 г. в г. Алексеевке Белгородской области — на родине российского подсолнечного масла. На сегодняшний день «ЭФКО» входит в тройку крупнейших компаний пищевой промышленности России, в тройку крупнейших компаний АПК России и является крупнейшим масложировым холдингом на рынке стран Евразийского экономического союза. Компания входит в число системообразующих предприятий пищевой промышленности и производителей продукции, влияющих на продовольственную безопасность РФ. Основные виды деятельности группы — переработка масличных культур, производство специализированных жиров и маргаринов, бутилированного масла, майонеза, кетчупа, молочной и кисломолочной продукции. География экспорта ГК «ЭФКО» включает более 50 стран мира.

С начала существования «ЭФКО» активно применяет новые технологии в сфере автоматизации на всех уровнях производства и менеджмента. Для эффективного контроля и учета производства продукции используется система уровня MES (Manufacturing Execution System), для оптимизации складской логистики применяется WMS (Warehouse Management System). Внедрение подобных систем и их совместная работа позволяет увеличить производительность труда. Но как показывает отечественная и зарубежная практика [1], высокий уровень бережливого производства достигается только путем объединения физических и информационных устройств в единую автоматическую систему.

Внедрение новых технологий применяется там, где обычно используется ручной или слабоавтомати-

зированный труд. Основные цели внедрения имеют экономический характер и связаны с сокращением численного состава персонала, снижением объемов брака в процессе паллетизации и фасовки продукции, приеме и учете продукции на складе, обмотке пленкой поддонов с продукцией и т. д.

Рассмотрим опыт построения РТК на территории ООО «ЭФКО Пищевые Ингредиенты», одной из компаний ГК «ЭФКО» по производству МЖП.

### Оценка уровня автоматизации

Для эффективного использования автоматических систем следует оценить текущий уровень автоматизации. Для анализа был взят склад площадки ООО «Пищевые Ингредиенты» для приема и хранения кондитерских жиров в коробах. Продукция в коробах поступает на склад с производства по трем конвейерам, далее грузчики укладывают ее на поддон, приемщик вручную заносит собранный поддон в систему уровня WMS. Далее продукт перемещается вилочным погрузчиком для хранения на стеллажи. Для отправки готовой МЖП покупателю паллета снимается со стеллажей и перемещается в грузовую машину (рис. 1).

Степень автоматизации зоны приемки продукции с производства по шкале Т. Шеридана [2] соответствует первому уровню, то есть человек должен принимать решение сам и выполнять все действия сам.

В укладке продукции на поддон задействован штат численностью 14 человек грузчиков и пять человек приемщиков. Режим работы людей сменный — по 12 ч. В одну смену принимает участие в работе три грузчика и один приемщик. Два других грузчика

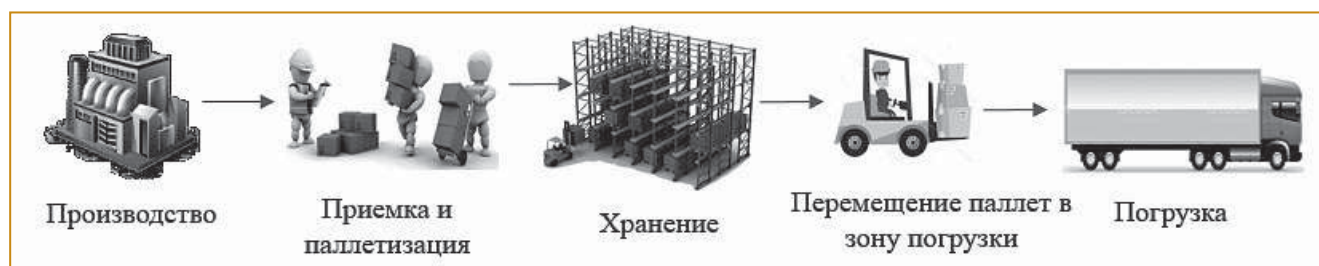


Рис. 1. Схема работы склада хранения жиров до автоматизации

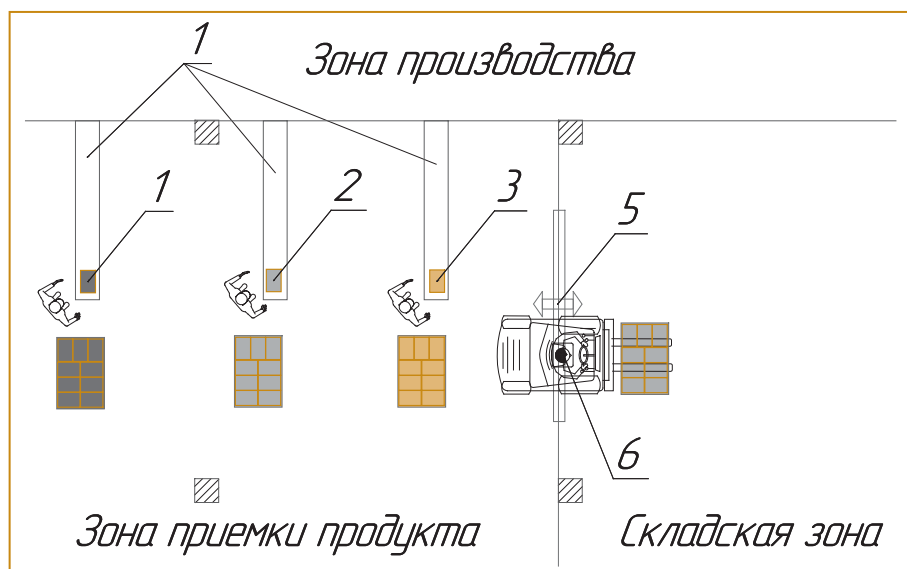


Рис. 2. Расположение рабочих зон участка укладки МЖП. Обозначено: 1-3 – участки ручной укладки с линиями 1, 2 и 3 соответственно; 4 – конвейеры подачи продукции; 5 – проход между зонами для вилочного погрузчика; 6 – вилочный погрузчик

Таблица 1. Характеристики поступающего продукта на склад

Производительность, кор./мин	линия №1	7
	линия №2	8
	линия №3	6
Массогабаритные показатели продукции, брутто	размеры, мм, Ш×Д×В	250×250×375
	вес, кг	21

Таблица 2. Параметры производительности РТК

Суммарная производительность, кор./мин	21
Число коробок на поддоне, кор.	45
Требуемое количество циклов, цикл/с	0,35
Время сборки одного поддона, мин	2,15
Длительность одного цикла, с	2,86

и один приемщик являются подменными и выходят на работу в случае отсутствия своих коллег. Для содержания персонала помимо заработной платы требуется обеспечение их безопасности, рабочая одежда, транспортировка до работы и проведение ежегодных медицинских комиссий.

**Постановка задачи**

Автоматизацию участка укладки МЖП предполагалось обеспечить путем внедрения РТК, решающего следующие задачи:

1. транспортировка продукции на склад из зоны производства в зону приемки продукта (рис. 2);
2. укладка готовой продукции в коробах на поддон;
3. перемещение собранного поддона в зону обслуживания вилочного погрузчика;
4. подача пустых поддонов в зону приемки продукта.

На первом этапе определялись входные параметры для РТК. Продукция поступает на склад по трем конвейерам (рис. 2), поэтому вычислялась производительность каждой линии. Расчет проводился по номинальной производительности имеющихся фасовочных машин на производстве, с округлением полученных результатов в большую сторону (табл. 1.) Там же приведены массогабаритные характеристики продукции в коробе. Со всех трех линий поступает габаритно идентичный продукт.

На производстве используется деревянный поддон ГОСТ 95557-87, размерами 1200×800×144 мм. С каждой линии продукция попадает на свой поддон. На каждый поддон укладывается 45 коробок (по 9 коробок в ряд), продукт не перемешивается. Для устойчивости поддона каждый четный ряд укладывается асимметрично нечетному.

На основании этих данных были сформированы требования к производительности и грузоподъемности РТК (табл. 2). Номинальная производительность  $Q_{РТК}$  определялась через число коробов  $n$ , уложенных за минуту. Зная номинальную производительность и число коробок на поддоне, определялось время загрузки одного поддона  $T_{под}$ :

$$Q_{РТК} = \frac{n}{t} = \frac{[кор]}{[мин]} = 21 \text{ кор./мин},$$

$$T_{под} = \frac{45}{Q_{РТК}} \approx 2,15 \text{ мин},$$

$$C_{цикл} = Q_{РТК} = 21 \frac{цикл}{мин} = 0,35 \frac{цикл}{с}$$

$$\frac{1}{C_{цикл}} = 2,86 \frac{с}{цикл}$$

Для непрерывности технологического процесса число циклов загрузки РТК в минуту  $C_{цикл}$  должно соответствовать числу поступающих коробок; следовательно, время укладки коробки на паллету не должно превышать 2,86 с. Время укладки можно увеличить, увеличив число переносимых коробок за один цикл.

С учетом параметров производительности РТК (табл. 2) схема расположения его оборудования выглядит следующим образом (рис. 3).

Коробки с МЖП подаются к роботу-паллетайзеру 4 по конвейерным линиям 1-3. Укладка продукции на поддон производится на цепных конвейерах 9-11,

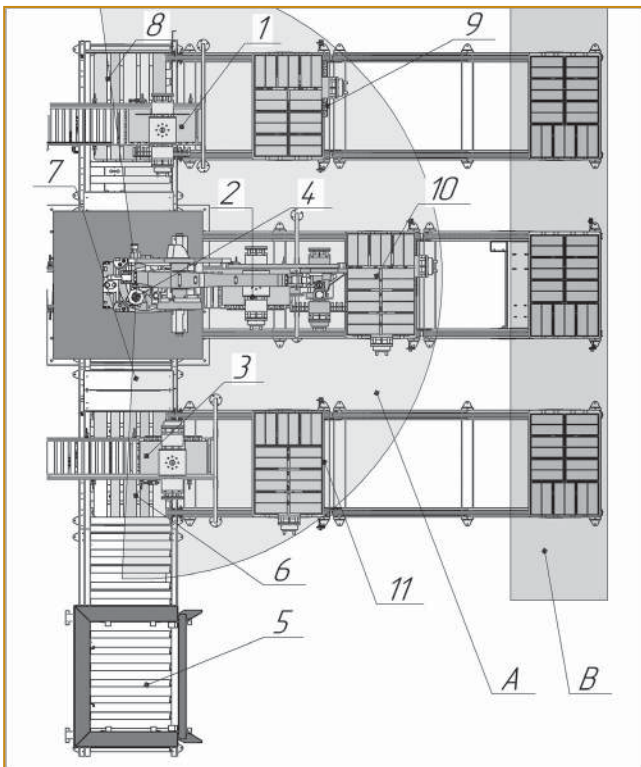


Рис. 3. Схема размещения оборудования РТК укладки МЖП: 1, 2, 3 – конвейерные линии подачи МЖП; 4 – робот-паллетайзер; 5 – диспенсер пустых поддонов с роликовым конвейером; 6, 7, 8 – конвейерные трансферные секции; 9, 10, 11 – цепные конвейеры для полных поддонов. А – зона комплектования поддона; В – зона выгрузки собранного поддона вилочным погрузчиком

подачу пустых поддонов обеспечивает диспенсер пустых поддонов с роликовым конвейером 5 и трансферные секции 6-8. Трансферная секция – это секция передающая поддон с роликового конвейера на цепной, путем опускания и поднимания цепного конвейера внутри роликового. Цепные конвейеры (после окончания комплектования поддона) перемещают его в зону забора вилочного погрузчика. На освободившееся место подается новый пустой поддон и цикл повторяется.

Структура системы управления РТК показана на рис. 4 [3].

В качестве центрального управляющего контроллера РТК выбран ПЛК S7-1200, который по шине Ethernet обменивается информацией с исполнительными объектами по протоколу TCP/IP по стандарту ProfiNet. Каждое устройство с помощью датчиков отслеживает свое состояние и передает текущее значение на блок дискретных входов/выходов ПЛК. Запуск и контроль РТК осуществляется с пульта с визуальным информационным интерфейсом HMI, которым управляет оператор. Робот-паллетайзер Fanuc серии 410iC/185 имеет свой собственный контроллер R-30iA Mate, программируемый на языке Karel. Конвейеры для продукции, цепные конвейеры, роликовый конвейер под диспенсером и трансферные секции управляются частотными преобразователями с целью плавного управления скоростью приводов. Скорость цепных конвейеров определенной опытным путем составляет 0,25 м/с; это обеспечивает плавное движение полного поддона с продукцией весом около 1 тонны.

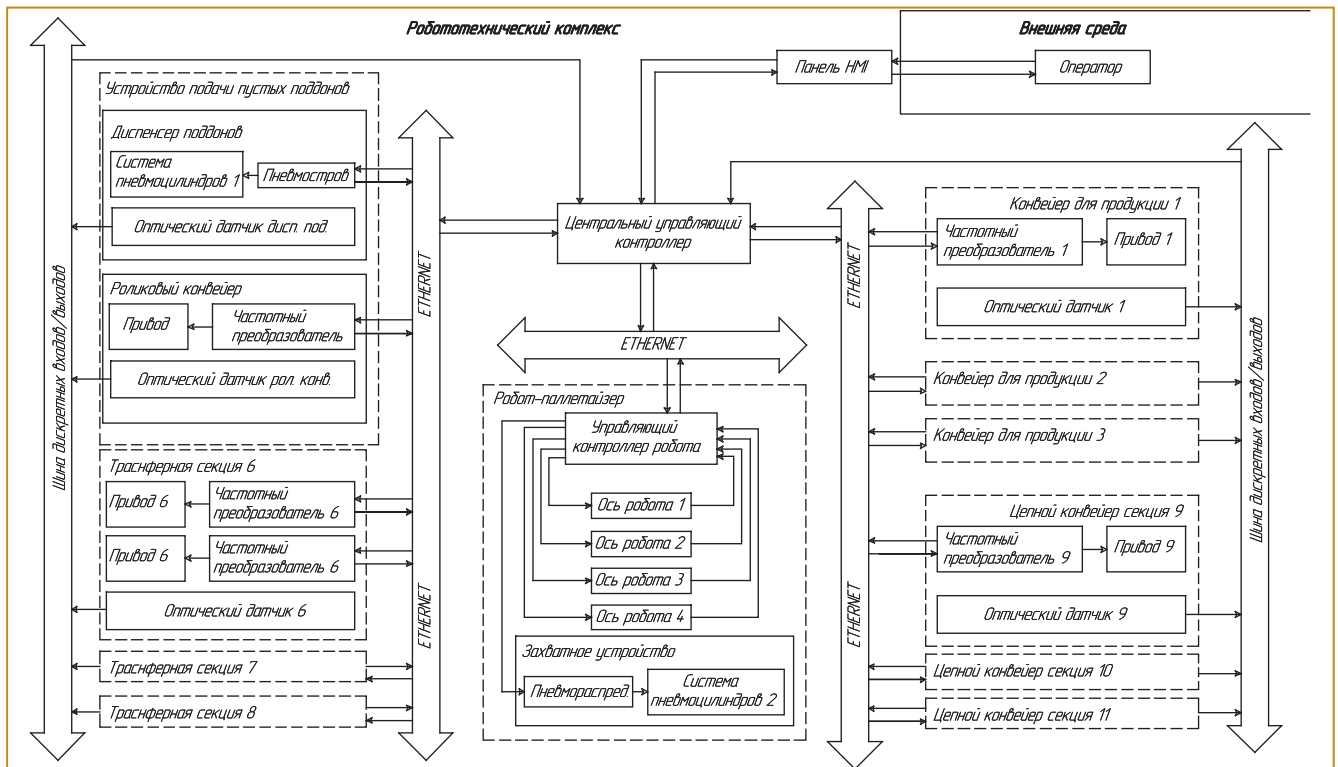


Рис. 4. Структура системы управления РТК укладки МЖП



Рис. 5. Опытный образец РТК

риметру сетчатым 3D-забором для защиты персонала от движущихся элементов. Слева на уровне глаз размещена НМИ-панель со световой индикацией для удобства и безопасности работы оператора. Также на участках, где есть риск попадания человека в зону работающего оборудования, установлены световые барьеры. Для обслуживания РТК в смену требуется один грузчик для укладки поддонов в диспенсер поддонов и оператор.

**Синтез управляющей сети РТК**

Используемые языки программирования в промышленных

Последовательность работы РТК следующая:

- оператор через НМИ-панель подает команду старта системы;
- РТК проверяет наличие коробок на трех конвейерах подачи продукта (поз. 1, 2, 3, рис. 3) и наличие пустых поддонов на цепных конвейерах (поз. 9, 10, 11);
- конвейерная линия для продукции не обслуживается роботом, если на ней нет продукта или если для нее нет пустого поддона на цепном конвейере;
- недостающий поддон поступает в зону обслуживания робота (поз. А) на цепной конвейер с диспенсера поддонов по роликовому конвейеру (поз. 5) и трансферным секциям (поз. 6, 7, 8);
- робот-паллетайзер перемещает захватное устройство к соответствующей конвейерной линии, на которой появился продукт (поз. 1, 2, 3);
- робот-паллетайзер забирает коробку с продукцией и укладывает ее на ближайший поддон, соответствующий линии;
- на свободную конвейерную линию подаются новые коробки и перемещаются в рабочую зону паллетайзера;
- цикл повторяется и после того, как поддон собран — он выгружается цепным конвейером из зоны комплектования в зону выгрузки (поз. В) вилочным погрузчиком;
- на цепной конвейер с диспенсера поддонов по роликовому конвейеру и трансферным секциям подается пустой поддон в зону комплектования поддона;
- сборка возобновляется после того, как поддон укомплектован.

Результатом разработки явился опытный образец РТК укладки МЖП из трех конвейерных линий, установленный на площадке ООО «ЭФКО Пищевые Ингредиенты» компании ООО ЭФКО Групп (рис. 5).

Размещение оборудования выполнено по схеме, приведенной на рис. 3. Робот-паллетайзер установлен на стальном постаменте, выдерживающим вес робота и развиваемые им динамические нагрузки. РТК огорожен по пе-

контроллерах не являются одинаково наглядным средством описания дискретных технологических процессов (ДТП) для программистов, эксплуатационного персонала, инженеров-конструкторов и т.д. Это обстоятельство послужило основанием для применения различных графических моделей в качестве наглядного описания ДТП. Графические модели целесообразно использовать в качестве первого этапа в общем сквозном цикле разработке программного продукта с помощью CASE-средств, что позволяет работать с ним всем выше указанным специалистам [4].

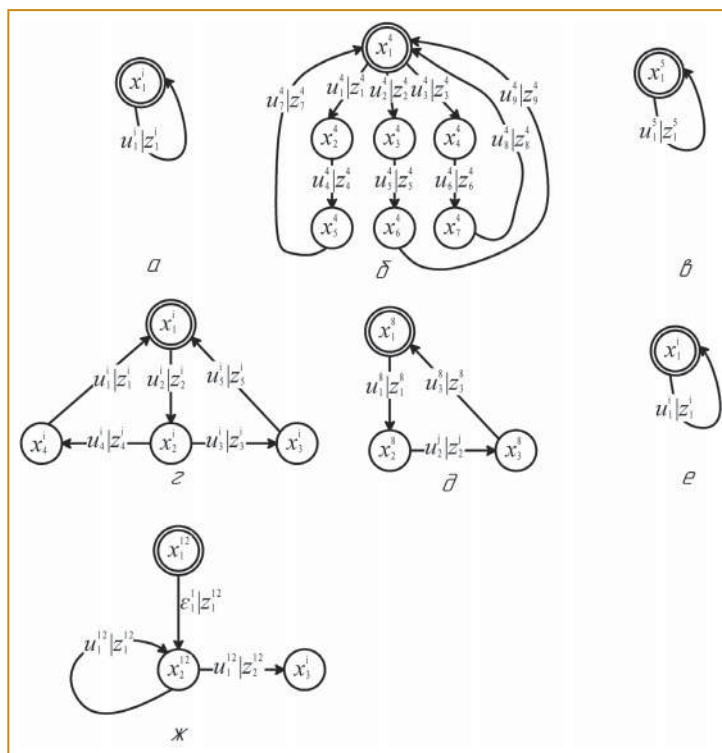


Рис. 6. Модели объектов управления: а – конвейера подачи МЖП с номерами 1, 2, 3; б – робота-паллетайзера; в – диспенсера поддонов с роликовым конвейером; г – трансферных секций с номерами 6, 7; д – трансферной секция с номером 8; е – цепных конвейеров с номерами 9, 10, 11; ж – оператора

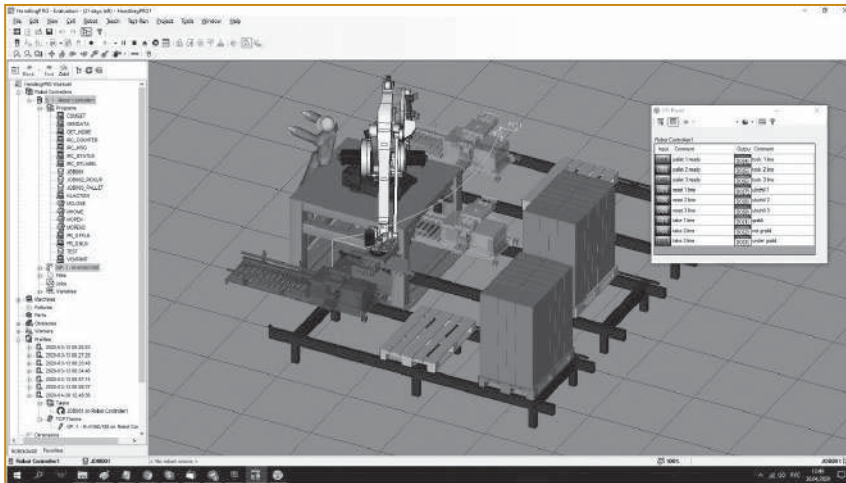


Рис. 7. Интерфейс программы моделирования робота Fanuc 410iC/185 в составе РТК

Одним из принятых вариантов графического описания ДТП является сеть Петри, которая, сохраняя графическую наглядность, имеет в своей основе строгий математический аппарат [4]. При определении топологии сети Петри в качестве основного элемента управляющей сети был выбран автомат с переменной структурой. Сами же объекты управления в ДТП удобно представлять логикой конечных автоматов [5]. На рис. 6 алгоритмы работы всех устройств в составе РТК представлены в виде конечно-автоматных моделей, где  $x_j^i$  — состояние автомата,  $u_j^i$  — входной сигнал,  $z_j^i$  — выходной сигнал.

Опишем модели объектов управления подробнее (рис. 6 и рис. 3):

- a* — конвейер подачи МЖП — циклически подает продукцию в зону комплектования;
- б* — робот-паллетайзер — начинает движение с базовой позиции к одной из трех линий подачи продукции для перемещения ее на соответствующий поддон;
- в* — диспенсер с роликовым конвейером выдает поштучно пустые поддоны на роликовый конвейер;
- г* — трансферные секции (6, 7) перемещают пустой поддон от роликового конвейера на цепные конвейеры (9, 10) или на следующую трансферную секцию (8);
- д* — трансферная секция (8) является конечной и может передавать поддон только на цепной конвейер (11);
- ж* — оператор выполняет функцию запуска и остановки РТК.

При построении сети Петри системы управления РТК с помощью управляющих автоматов использовалась пара функций привязки ( $\Phi$ ,  $\Psi$ ), характеризующие отношение параметров управляющих автоматов к параметрам сети Петри. Здесь  $\Phi: P \rightarrow U_{i=1}^n X_i$  — привязка позиций сети Петри к состояниям управляемых автоматов;  $\Psi: T \rightarrow U_{i=1}^n U_i \times Z_i$  — привязка переходов сети Петри к парам (входной символ, выходной символ) управляемых автоматов, где  $P$  — это множество позиций,  $T$  — множество переходов,  $X$  — множество состояний автомата, а  $U$  и  $Z$  — множество соответственно входных и выходных сигналов автомата [6].

Значения функции  $\Psi$  на рис. 6 приведены в виде пар  $u_p^k | z_p^k$  рядом с переходами сети Петри. Значения функции  $\Psi$  на рис. 6 не показаны [6].

По окончании разработки системы управления РТК необходим анализ, способный выявить возможные недостатки в системе. Одним из таких способов является исследование системы с произвольно выбранного состояния, в котором может оказаться спроектированная модель при ее функционировании [7]. Для этой цели использовалось программное обеспечение PIPE2, позволяющее производить интерактивное моделирование сети [8].

Представление алгоритма управления РТК в виде сети Петри позволило определить логику обмена сигналами между управляющими элементами для обеспечения общей логики работы РТК и создать графически наглядный для всех специалистов, участвующих в проекте, алгоритм работы системы.

#### Моделирование робота-паллетайзера РТК

Разработанная структура сети Петри РТК описывает единый алгоритм работы всех исполнительных устройств. В то же время сеть не позволяет в полной мере оценить эффективность настройки отдельного узла, особенно такого сложного, как робот. Поэтому функционирование робота-паллетайзера было промоделировано отдельно в среде RoboGuide, предназначенной для эмуляции и программирования РТК на базе роботов FANUC (рис. 7) [9]. Эмулировался технологический процесс комплектования поддонов, для которого рассчитывалась траектория движения захватного устройства и определялись временные параметры отдельных циклов.

В соответствии с требованиями, приведенными в табл. 2, в качестве паллетайзера был выбран робот Fanuc 410iC/185 с досягаемостью в радиусе 3143 мм и грузоподъемностью 185 кг. Управление паллетайзером производится собственным контроллером Fanuc R-30iA Mate. Связь этого контроллера с центральным управляющим контроллером РТК ПЛК Siemens S7-1200 осуществляется по технологии Ethernet по принципу master/slave.

Информационные сигналы между контроллерами:

1. от ПЛК к контроллеру робота:
  - наличие/отсутствие МЖП в коробке на конвейерной линии 1, 2, 3;
  - наличие/отсутствие поддона на цепном конвейере 9, 10, 11;
  - запуск/останов паллетайзера по команде оператора.
2. от контроллера робота к ПЛК:
  - готовность к работе;

- наличие внутренней ошибки;
- завершение цикла комплектования поддона (поддон собран).

Результатом моделирования техпроцесса комплектования поддон является созданная и отлаженная программа управления паллетайзером, исключающая пересечение его траектории движения с другими объектами РТК.

#### Заключение

Создание описанного РТК и его внедрение в производственный процесс позволило получить важный опыт разработки подобных комплексов, различной функциональной направленности.

В результате внедрения РТК укладки в производственную цепочку изготовления МЖП удалось снизить численность низкоквалифицированного рабочего персонала: грузчиков с 14 до пяти человек. При этом даже опытная эксплуатация РТК в тестовом режиме показала улучшение качества сборки поддонов при существенном увеличении производительности с 7 до 21 кор./мин; в том числе сыграло роль снижение человеческого фактора при укладке. В дальнейшем планируется интеграция разработанного РТК с WMS склада для упрощенного учета и контроля собранных поддонов в рамках развития концепции безлюдного производства на предприятии.

#### Список литературы

1. *Guilherme Luz Tortorella, Ricardo Giglio, Desirée H. Van Dun.* Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement, *International Journal of Operations*

& Production Management. Vol. 39 No. 6/7/8, 2019. P.p. 860-886.

2. *Кораблев И.Г., Решетников И.С.* Оценка уровня автоматизации производственных систем // *Автоматизация в промышленности.* 2020. №1. С. 38-42.

3. *Горитов А.Н.* Архитектура системы автоматизированного моделирования робототехнического комплекса // *Программные продукты и системы.* 2001. № 2. С. 17-19.

4. *Дружинин В.А., Бордя Т.Д.* Использование сетей Петри для моделирования технологических процессов // *Радиоэлектроника, информатика, управление.* 1999. №2. С. 65-71.

5. *Максимов А.А., Гао Чжунин.* Управление робототехническими комплексами на основе конечных автоматов с переменной структурой // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение».* 2001. С. 112-128.

6. *Максимов А.А.* Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение».* 2012. С. 14-28.

7. *Матющенко А.А.* Обзор программных средств моделирования Сетей Петри // *Автоматизация технологичных и бизнес-процессов.* 2015. №3. С. 68-71.

8. *Марков А.В., Воевода А.А.* Проверка достижимости маркировки сетей Петри при помощи инвертирования деревьев состояний для протокола передачи данных // *Управление, вычислительная техника и информатика. Доклады ТУСУРа.* 2014. № 1, (31). С. 143-148.

9. *Журавков М.А., Grassi E., Громыко О.В., Громыко А.О., Царева А.А.* Методика моделирования функционирования робототехнических комплексов семейства Fanuc в пакете RoboGuide // *Информатизация образования – 2010: педагогические аспекты создания информационно образовательной среды: материалы междунар. науч. конф., Минск: БГУ, 2010. С. 205-209.*

**Сытов Евгений Викторович** – инженер-конструктор робототехнических комплексов,  
**Резницкий Михаил Александрович** – инженер-программист филиал  
 АО «Управляющая компания ЭФКО» в г. Алексеевке,

**Воротников Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
 Контактный телефон 8-800-505-03-02.

E-mail: [evsytov@gmail.com](mailto:evsytov@gmail.com) [s\\_vorotnikov@mail.ru](mailto:s_vorotnikov@mail.ru), [mihail.reznitsky@gmail.com](mailto:mihail.reznitsky@gmail.com)

#### ABB Ability™ Augmented Field Procedures - безопасность работников и эффективность процессов предприятий ТЭК

Компания разработала инновационную технологию на основе дополненной реальности, направленную на цифровку действий технического специалиста на объекте и улучшение обмена информацией между ним и центральным диспетчерским пунктом.

Решение полностью отвечает потребностям технических специалистов, находящихся на объекте, проводит интеграцию полевых и распределенных систем управления, что повышает безопасность, снижает риски, связанные с человеческим фактором, и повышает эффективность работы.

Считается, что более 20% промышленных простоев<sup>1</sup>, обусловлены человеческим фактором. Решение ABB Ability™ с технологиями дополненной реальности обеспечивает согласованность действий при проведении операций, выполняемых вручную, при стандартизации методик работы, обслуживании и ремонте на объекте. Оно также применяется для цифровой регистрации и использования системных данных.

В отличие от традиционных печатных инструкций по эксплуатации решение ABB позволяет вести работы в интерактивном режиме с помощью мобильного устройства, чтобы последовательно, эффективно и безопасно направлять каждое действие оператора. Используя промышленные планшеты, смартфоны или интерактивный комплекс Microsoft HoloLens, операторы смогут получать доступ к данным производственного оборудования, процессам или процедурам в режиме реального времени, что значительно улучшит взаимодействие и позволит мгновенно регистрировать данные с объекта через пользовательский интерфейс.

Система может быть использована в любой промышленной среде как на новых, так и на уже существующих проектных площадках для пуско-наладочных работ, планового технического обслуживания и при простоем производства.

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