

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 658.512

DOI: 10.30987/article_5c0f808e9b29f7.40393956

Е.Б. Фролов, А.С. Климов, Зин Мин Хтун

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАТЕГОРИИ MES

Рассмотрены базовые концепции «индустриальной революции 4.0» (Industry 4.0). Особое внимание уделено инженеринговым и эксплуатационным моделям цифровых двойников производственной системы, используемых для оптимизации и управления материальными потоками предприятия на этапе изготовления продукции. В качестве базового программного обеспечения выбраны исполнительные производственные системы MES (Manufacturing Execution Systems).

Ключевые слова: Industry 4.0, цифровой двойник, производственная система, MES, оптимизация материальных потоков.

E.B. Frolov, A.S. Klimov, Zin Min Htun

DIGITAL TWIN OF PRODUCTION SYSTEM BASED ON SOFTWARE OF MES CATEGORY

The paper reports the consideration of basic concepts of “industrial revolution 4.0” (Industry 4.0). Particular attention is paid to engineering and operational models of the digital twins of the production system used for the optimization and control of company material flows at the stage product manufacturing. As a basic software there are chosen manufacturing executive systems MES (Manufacturing Execution Systems). There are shown examples of manufacturing system effectiveness increase on the basis of its digital twin with the aid of the procedure of multi-criterion optimization.

Key words: Industry 4.0, digital twin, production system, MES, material flow optimization.

Введение

Производственная система – особый вид организационно-технической системы, состоящий из средств и предметов производства, базы конструкторско-технологической информации, производственных процессов и комплексов управления ими, совместное функционирование которых позволяет изготавливать изделия, отвечающие своему служебному назначению.

Современный мир, пройдя в своей истории через три промышленные революции, столкнулся с новым понятием – «индустриальная революция 4.0» (Industry 4.0), новацией, рассматриваемой как надвигающаяся четвертая промышленная революция. Именно на этом четвертом этапе стало активно использоваться понятие так называемых цифровых двойников (Digital Twins). Этот термин появился еще в начале 2000-х, но с каждым годом, по мере развития промышленных и компьютерных технологий, он получает новое наполнение. Базовая концепция несложна для понимания: мониторинг физического объекта осуществляется на основе замкнутого цикла информационного обмена между ним и его виртуальной моделью (тем самым цифровым двойником) [1].

Говоря о концепции «индустриальной революции 4.0», обычно выделяют шесть базовых инновационных концептуальных подходов к ее реализации:

1. Product Lifecycle Management (PLM) – управление жизненным циклом изделия.

2. BIG Data – большие данные.

3. SMART Factory – интеллектуальный завод.

4. Cyber-physical Systems – киберфизические системы.

5. Internet of Things (IoT) – интернет вещей.

6. Interoperability – интероперабельность (функциональная совместимость).

На стадии управления жизненным циклом изделия (PLM) создается так называемый цифровой двойник изделия, а на стадии организации производства и изготовления (SMART Factory) формируется цифровая модель материальных потоков, представляющая собой цифровой двойник производственной системы.

Цифровой двойник изделия включает: геометрическую и структурную модели объекта; набор расчётных данных деталей, узлов и изделия в целом (математические модели, описывающие все происходящие

в объекте физические процессы); информацию о технологических процессах изготовления и сборки отдельных элементов; систему управления жизненным циклом изделия. Цифровой двойник изделия может использовать модифицированную численную модель с изменёнными характеристиками износа или производительности. Информация от датчиков, подключённых к реальному объекту, может передаваться цифровому двойнику изделия в качестве граничных условий в режиме реального времени с целью моделирования, анализа и прогноза поведения объекта в рамках его служебного назначения.

Цифровые двойники изделия: эволюция и классификация

Впервые полноценно эта концепция была описана в Мичиганском университете в 2002 г. Сейчас цифровым двойником изделия называют его виртуальную модель, которая на микро- и макроуровне либо описывает реально существующий объект (выступая как дубль готового конкретного изделия), либо служит прототипом будущего объекта. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физически существующего изделия, должна быть получена и на базе тестирования его цифрового двойника.

Цифровой двойник изделия применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включая проектирование, производство, эксплуатацию и утилизацию. Сейчас распространена классификация, включающая три типа двойников изделия: цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA).

DTP-двойник характеризует изделие, прототипом которого он является, и содержит информацию, необходимую для

описания и создания физических версий экземпляров изделия. Эта информация включает геометрическую и структурную модели, технические требования и условия, стоимостную модель, расчетную (проектную) и технологическую модели изделия. DTP-двойник можно считать условно постоянной виртуальной моделью изделия.

DTI-двойники изделия описывают конкретный физический экземпляр семейства изделия, с которым двойник остается связанным на протяжении всего срока службы. Двойники этого типа создаются на базе DTP-двойника и дополнительно содержат производственную и эксплуатационную модели, которые включают историю изготовления изделия, применимость материалов и комплектующих, а также статистику отказов, ремонтов, замены узлов и агрегатов и др. Таким образом, DTI-двойник изделия подвергается изменениям в соответствии с изменениями физического экземпляра при его эксплуатации.

DTA-двойники изделия определяются как информационная система управления физическими экземплярами семейства изделия, которая имеет доступ ко всем их цифровым двойникам.

Понятие цифрового двойника производственной системы

Практическая реализация концепции Industry 4.0 потребовала пересмотра информационного описания производственной системы и реализуемых в ней процес-

сов, особенно на стадии создания интеллектуального завода (SMART Factory).

Во многом это вызвано отсутствием у современных информационных систем машиностроительных предприятий воз-

возможности использовать цифровые двойники изделий при технологической подготовке производства и в управлении процессом изготовления этих изделий. Указанные компьютерные модели также становятся малоинформативными, когда возникает потребность в оптимизации материальных потоков на этапе производства изделий.

Этапы жизненного цикла производственной системы отличаются от этапов жизненного цикла производимых изделий. Основным отличием является то, что производственная система машиностроительного предприятия на этапе ее эксплуатации подвержена функциональным и структурным изменениям. Это вызвано как необходимостью её технического перевооружения при изменении номенклатуры и/или программы выпуска, так и требованием повышения общей эффективности станочной системы (коэффициента OEE – Overall Equipment Effectiveness) при сокращении цикла изготовления изделий (коэффициента MCE – Manufacturing Cycle Effectiveness). В результате этих изменений создаются новые конфигурации производственной системы [1; 2].

Задача цифровизации производственной цепочки обусловлена требованием обеспечения прозрачности производства [3] и оперативного отслеживания его текущих изменений, что позволяет на основе математических моделей многокритериальной оптимизации эффективно управлять соответствующими материальными потоками. Цифровой двойник производства позволяет моделировать изменения (улучшения) и просчитывать их возможные последствия при реализации на уровне исполнительных подразделений. Получение обратной связи математической модели процесса и его реального поведения в режиме on-line является актуальной задачей обработки и анализа больших данных (Big Data), формируемых с помощью индустриального интернета (IoT).

Следовательно, если на стадии управления жизненным циклом (PLM) применяются цифровые двойники изделий,

то на стадии интеллектуального завода (SMART Factory) встает новая актуальная задача - задача эффективного использования технологического оборудования предприятия на основе цифровизации производства. Возникает необходимость цифрового дуализма иного рода - цифрового двойника производственной системы (ПС), инструмента, моделирующего производственные процессы [2; 4].

Поэтому по аналогии с цифровым двойником изделия формируется и цифровой двойник производственной системы применительно к ее конкретной конфигурации.

Цифровой двойник производственной системы включает в себя:

- Инжиниринговую модель ПС, содержащую цифровое описание ресурсов предприятия, структуру станочной системы, средства технологического оснащения, номенклатуру и технологии изготовления изделий, систему сбора информации о текущем состоянии оборудования.

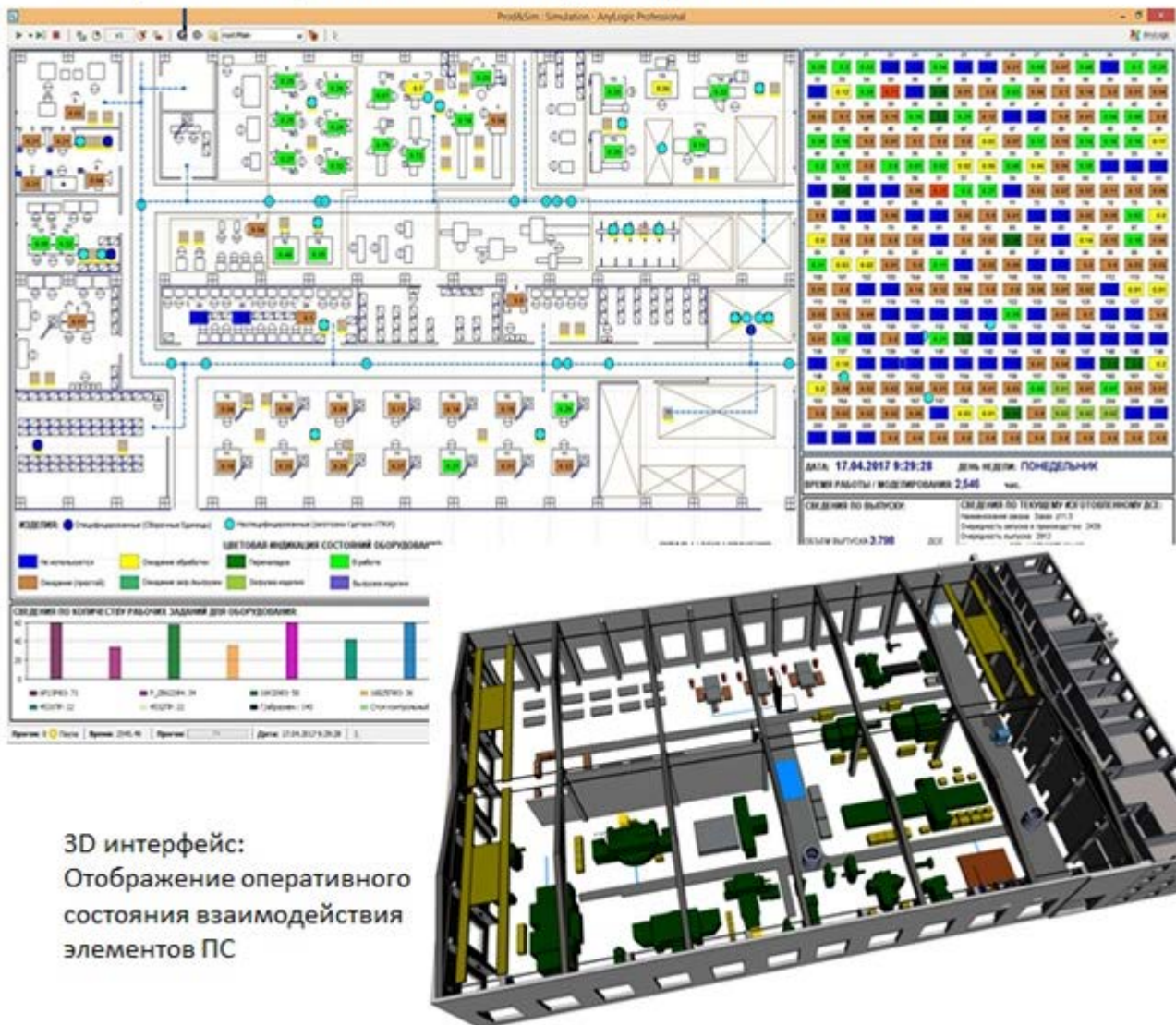
- Эксплуатационную модель ПС, являющуюся цифровой платформой для описания логистической архитектуры предприятия, формирования планов-графиков изготовления изделий, межцеховой и внешней кооперации, включая регламенты технического обслуживания и ремонта оборудования. Математическому описанию также подлежат динамика внутрицеховых материальных потоков, на основе цифровизации которых формируются оптимальные производственные расписания выполняемых работ.

Наиболее сложной для практической реализации является эксплуатационная модель цифрового двойника ПС, на которую, в частности, возлагаются следующие функции:

- проводить необходимые расчеты для принятия управленческих решений;
- отображать в режиме реального времени производственные процессы, протекающие в производственной системе;
- проводить различные эксперименты путем математического моделирования производственных процессов.

2D интерфейс:

Отображение оперативного состояния производственных показателей



3D интерфейс:

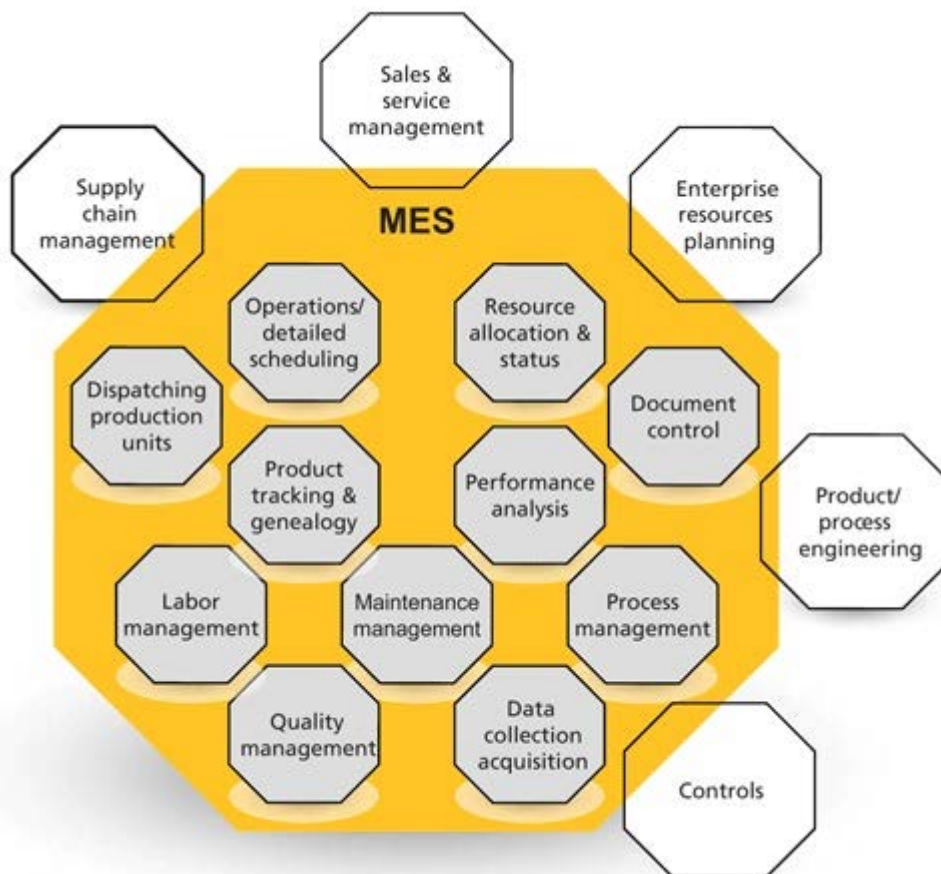
Отображение оперативного состояния взаимодействия элементов ПС

Рис. 1. Автоматизированная процедура инжиниринга производственных систем на базе AnyLogic

Фрагменты адекватных моделей цифрового двойника ПС существуют уже сегодня. Пример системы сбора и отображения оперативного состояния взаимодействия элементов производственной системы приведен на рис. 1.

Оптимизация внутрицеховых материальных потоков достигается на сего-

дняшний день средствами специального софта категории MES (Manufacturing Execution System) [4; 5; 7] - программного обеспечения, предназначенного для оперативного календарного планирования производства. На рис. 2 представлены функциональные требования к MES-системам.



- Контроль состояния и распределение ресурсов (RAS) – Resource allocation & status
- Оперативное/детальное планирование (ODS) – Operation detailed scheduling
- Диспетчеризация производства (DPU) – Dispatching production units
- Управление документами (DOC) – Document control
- Сбор и хранение данных (DCA) – Data collection acquisition
- Управление персоналом (LM) – Labor management
- Управление качеством продукции (QM) – Quality management
- Управление производственными процессами (PM) – Process management
- Управление техобслуживанием и ремонтом (MM) – Maintenance management
- Отслеживание истории продукта (PTG) – Product tracking & genealogy
- Анализ производительности (PA) – Performance analysis

Рис. 2. Состав функций MES (источник: MESA International)

Это программное обеспечение, включенное в эксплуатационную модель цифрового двойника ПС, рассчитывает производственное расписание по различным оптимизационным критериям. В расчете используются технологические процессы изготовления изделий, где ставится многокритериальная оптимизационная задача максимизировать коэффициент ОЕЕ

при эффективном снижении потерь рабочего времени технологического оборудования, что равносильно снижению значения показателя МСЕ - цифрового показателя, характеризующего эффективность производственного цикла [6]. Пример многокритериальной оптимизации производственного расписания средствами MES приведен на рис. 3.

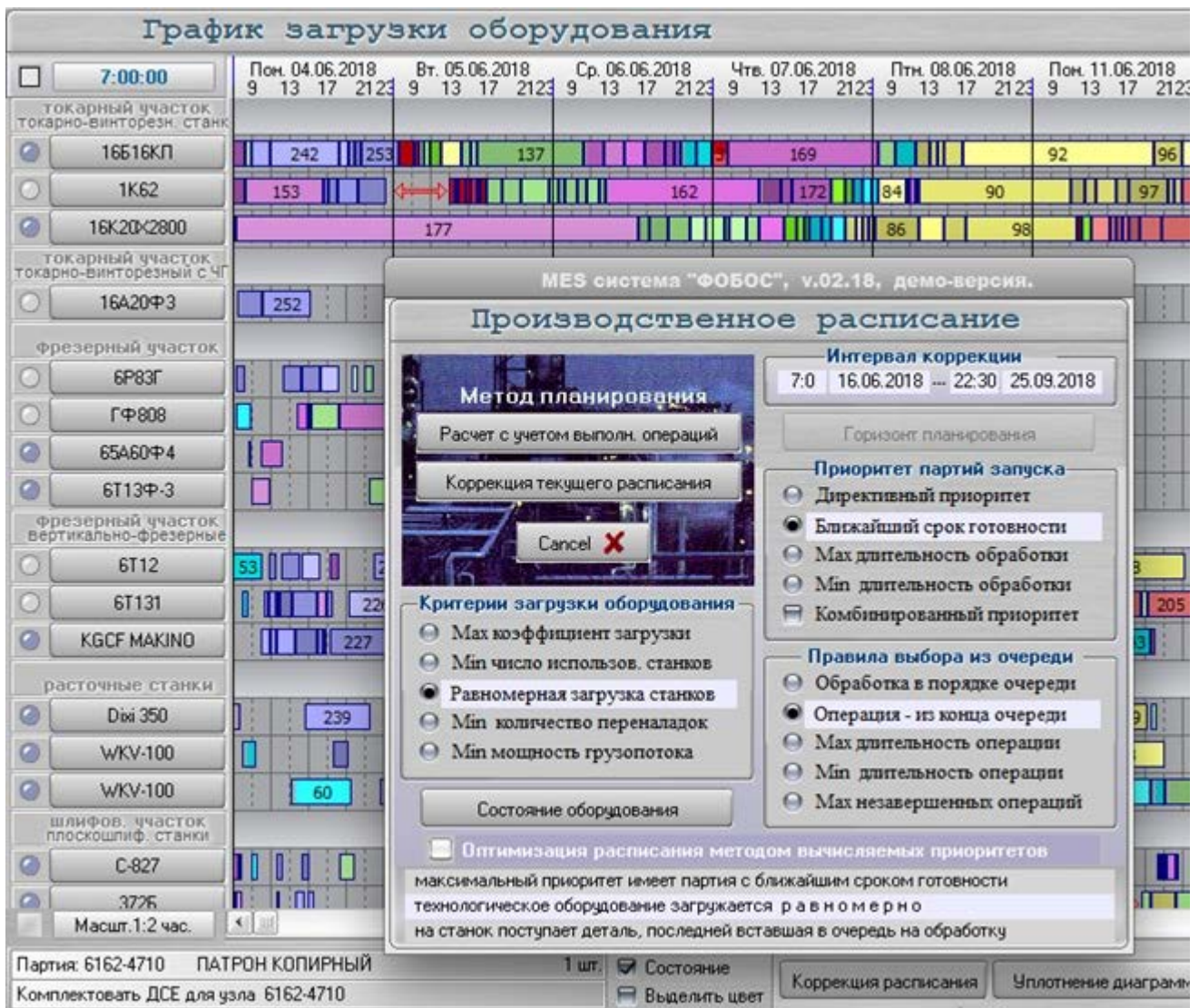


Рис. 3. Процедура формирования производственных расписаний на базе MES-системы «ФОБОС»

Еще одной важной задачей эксплуатационной модели цифрового двойника производственной системы является минимизация возможных отказов технологического оборудования за счет своевременного проведения планово-предупредительных ремонтов (ТОиР). Часто эта функция реализуется в системах производственного управления класса ERP (Enterprise Resource Planning). На уровне

эксплуатационной модели цифрового двойника ПС функции ТОиР учитываются как дополнительные операции, оптимизируемые в оперативном плане производства так, чтобы они минимально влияли на скорость прохождения обрабатываемых изделий через станочную систему предприятия. Эту задачу сегодня принимают на себя MES-системы (рис. 4) [4; 5; 7].

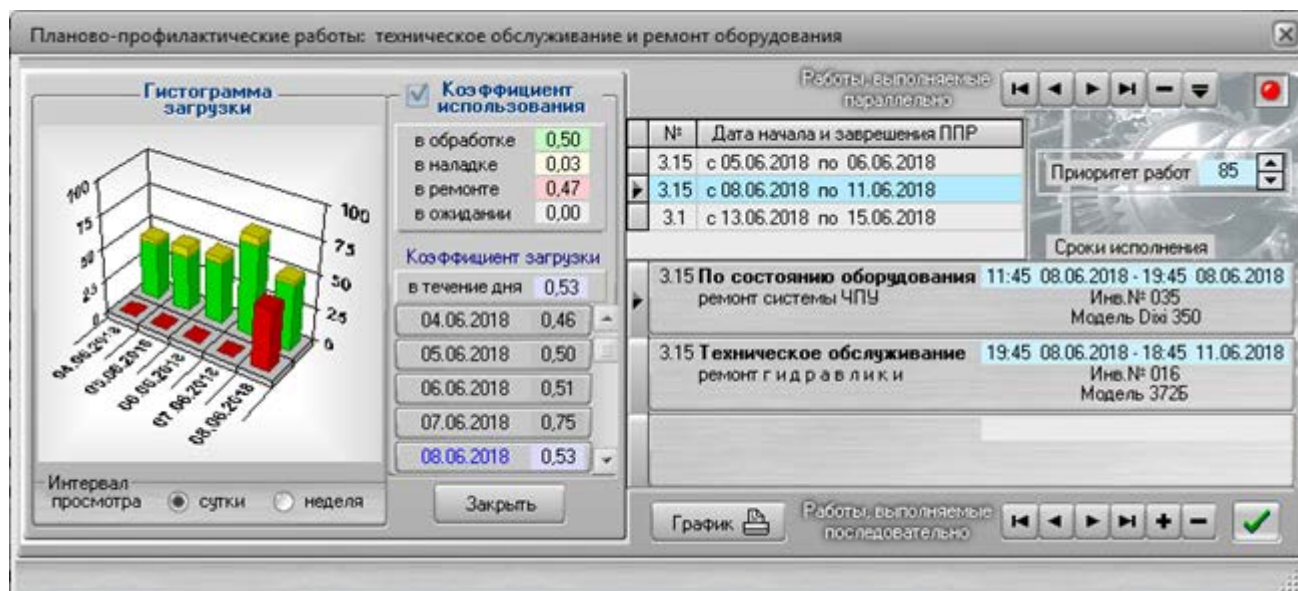


Рис. 4. Пример системы планирования технического обслуживания и ремонта оборудования

Важно, чтобы цифровая модель ПС поддерживалась в актуальном состоянии через реализацию непосредственной связи с оборудованием и производственными постами с учетом текущего состояния изготавливаемых изделий. Для решения этой задачи, которое в настоящий момент времени базируется на системах класса MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition) или

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [7], используется промышленный интернет (IoT - Internet of Things). Последний призван обеспечить связь сенсоров, датчиков и другой аппаратуры сбора данных с существующими системами управления производством и эксплуатационной моделью цифрового двойника производственной системы.

Заключение

Понятие цифрового двойника (Digital Twin), являющееся фундаментальным понятием цифрового производства (Smart Factory), следует связывать как непосредственно с самим изделием - в этом случае применяется термин «цифровой двойник изделия», - так и с процессом изготовления изделий - в этом случае следует использовать термин «цифровой двойник производственной системы». Последний включает в себя как инжиниринговую, так и эксплуатационную цифровые модели. Используются

совместно на этапе жизненного цикла изделия (Product Lifecycle Management), эти цифровые двойники должны быть функционально связаны между собой (Interoperability) и обеспечивать эксплуатационные характеристики проектируемого и изготавливаемого изделия в соответствии с его служебным назначением. В основе эксплуатационных моделей цифровых двойников ПС лежит программное обеспечение категории MES (Manufacturing Execution Systems).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломенцев, Ю.М. «Цифровой двойник» производственной системы - перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия / Ю.М. Соломенцев, Е.Б. Фролов // Станочный парк. - 2018. - № 8. - С. 36-39.
2. Долгов, В.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-

технологической системы машиностроительного предприятия / В.А. Долгов, А.А. Кабанов // Автоматизация. Современные технологии. - 2018. - № 4. - С. 178-184.

3. Фролов, Е.Б. Как добиться «прозрачности» производства, или Стандарты ИСО и промышленный софт на предприятии / Е.Б. Фролов, В.В.

- Крюков, Д.М. Тимофеев, А.В. Крюков // Генеральный директор. - 2010. - № 11. - С. 22-27.
4. Соломенцев, Ю.М. Планирование в современных системах управления производством / Ю.М. Соломенцев, Р.Р. Загидуллин, Е.Б. Фролов // Технология машиностроения. - 2010. - № 4. - С. 76-81.
 5. Фролов, Е.Б. Исполнительные производственные системы - инструмент эффективного управления машиностроительным предприятием / Е.Б. Фролов, А.Р. Залыгин, А.В. Нестеров // Генеральный директор. - 2013. - № 2. - С. 76-79.
 6. Соломенцев, Ю.М. Современные методы повышения эффективности машиностроительных производств / Ю.М. Соломенцев, Е.Б. Фролов // Технология машиностроения. - 2015. - № 8. - С. 54-58.
 7. Enterprise-Control System Integration. Part 1. Models and Terminology: Standard 1, ISA-95.01-1999.
 1. Solometsev, Yu.M. "Digital Twin" of manufacturing system – promising tool to increase machine park effectiveness of engineering enterprise / Yu.M. Solomentsev, E.B. Frolov // *Machine Park*. – 2018. – No.8. – pp. 36.-39.
 2. Dolgov, V.A. Basic approaches to formation of information model of industrial-processing system of engineering enterprise / V.A. Dolgov, A.A. Kabanov // *Automation. Modern Technologies*. – 2018. – No.4. – pp. 178-184.
 3. Frolov, E.B. How to achieve production “transparency” or ISO Standards and industrial soft at enterprise / E.B. Frolov, V.V. Kryukov, D.M. Timofeev, A.V. Kryukov // *Director General*. – 2010. – No.11. – pp. 22-27.
 4. Solomentsev, Yu.M. Planning in modern systems of production control / Yu.M. Solomentsev, R.R. Zagidullin, E.B. Frolov // *Engineering Technique*. – 2010. – No.4. – pp. 76-81.
 5. Frolov, E.B. Executive manufacturing systems – tool for efficient management of engineering enterprise / E.B. Frolov, A.R. Zalygin, A.V. Nesterov // *Director General*. – 2013. – No.2. – pp. 76-79.
 6. Solomentsev, Yu.M. Modern methods to increase effectiveness of engineering enterprises / Yu.M. Solomentsev, E.B. Frolov // *Engineering Technique*. – 2015. – No.8. – pp. 54-58.
 7. Enterprise-Control System Integration. Part 1. Models and Terminology: Standard 1, ISA-95.01-1999.

Статья поступила в редакцию 13.09.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Московского технического университета связи и информатики

Саксонов Е.А.

Статья принята к публикации 12.11.18.

Сведения об авторах:

Фролов Евгений Борисович, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН, Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», e-mail: fobos.mes@gmail.com.

Frolov Evgeny Borisovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Institute of Design-Technological Informatics of RAS of Moscow State Technological University “STANKIN”, e-mail: fobos.mes@gmail.com.

Климов Александр Сергеевич, аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН».

Зин Мин Хтун, аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН».

Klimov Alexander Sergeevich, Post graduate student of Moscow State Technological University “STANKIN”.

Zin Min Htun, Post graduate student of Moscow State Technological University “STANKIN”.