

изделий машиностроения и приборостроения – М.: ВНИИ-ИНМаш, 1973. – 102 с.

6. **Генкин, С.И.** Методы оценки технологичности конструкций изделий машиностроения. – М.: ВНИИИНМаш, 1974. – 173 с.

7. **Бочкарев, П.Ю.** Оценка производственной технологичности: учеб. пособие / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова. – СПб.: Изд-во "Лань", 2017. – 132 с.

8. **Соломенцев, Ю.М.** Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов [и др.]. – М.: Наука, 2003. – 292 с.

9. **Сафонов, С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. – 225 с.

10. **Базров, Б.М.** Проблема обеспечения технологичности изделия // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №4(58). – С. 30-34.

11. **Базров, Б.М.** Технологичность конструкции изделия и ее оценка // Вестник машиностроения. – 2018. – №6. – С. 47-50.

## REFERENCES

1. RSS 14.205-83. *Product Design Manufacturability. Terms and Definitions*: Official Edition. Instead of RSS 18831-73. – М.: Standards Publishers, 1983.

2. RSS 14.201-83\*. *Assurance of Product Design Manufacturability. General Requirements*: Official Edition instead of RSS 14.201-73. – М.: Standards Publishers, 1983, - pp. 9.

3. *Product Design Manufacturability*: reference book / under the general editorship of Yu.D. Amirov. – 2-d edition re-

vised and supplemented. – М.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 768.

4. MR 186-85. *Product Design Manufacturability Assurance of Engineering and Instrument Making. Methodical Recommendations*: Official Edition. – М.: AURIMach, 1985. – pp. 52.

5. Yanovsky, G.A. *Procedure of Design Optimization for Manufacturability and Manufacturability Assessment of Engineering Products and Products of Instrument Making* – М.: AURIMach, 1973. – pp. 102.

6. Genkin, S.I. *Methods for Assessment of Engineering Product Manufacturability*. – М.: AURIMach, 1974. – pp. 173.

7. Bochkaryov, P.Yu. *Assessment of Manufacturability: manual* / P.Yu. Bochkaryov, L.G. Bokova. – S-Pb.: "Lan" Publishers, 2017. – pp. 132.

8. Solomentsev, Yu.M. *Information-Computer Systems in Mechanical Engineering CALS-Technologies* / Yu.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, V.V. Pavlov [et al.]. – М.: Science, 2003. – pp. 292.

9. Safonov, S.V. *Technological Support of Product Operation Characteristics*. – Voronezh: IPC VSU, 2015. – pp. 225.

10. Bazrov, B.M. Problem in support of product manufacturability // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.4 (58). – pp. 30-34.

11. Bazrov, B.M. Manufacturability of product design and its assessment // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2018. – No.6. – pp. 47-50.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 658.512

DOI: 10.30987/article\_5c486cc51ea422.53107269

**Е.Б. Фролов**, д.т.н.,  
**И.С. Паршина**, аспирант,  
**А.С. Зайцев**, магистр

(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
103155, Россия, г. Москва, Вадковский пер.3а)

**А.С. Климов**, аспирант  
(ФГАУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055, Москва, а/я 24, ИКТИ РАН)  
E-mail: fobos.mes@gmail.com

## Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы

*Цифровое предприятие является частью концепции Индустрия 4.0 (Industry 4.0), которая позволяет в течение всего жизненного цикла продукта рассматривать организацию производства и управление цепочкой создания изделий на новом уровне. Это полностью автоматизированное цифровое производство, которое в режиме реального времени управляется интеллектуальными системами в непрерывном взаимодействии с внешней средой.*

**Ключевые слова:** Индустрия 4.0; цифровой двойник; MES; коэффициенты OEE и MCE.

E.B. Frolov, Dr. Sc. Tech.,

I.S. Parshina, Post graduate student,

A.S. Zaitsev, Master,

(Moscow State Technological University "STANKIN", 3a, Vadkovsky Side Str, Moscow, Russia, 103155)

A.S. Klimov, Post graduate student

(FSAIN Institute of Design-Technological Informatics of RAS, IDTI RAS, p.o.b. 24, Moscow, 127055)

## Industry 4.0: «Digital Counterpart» as means for effectiveness increase of production system

*A digital enterprise is a part of the (Industry 4.0) Concept which allows considering the production organization and control of product manufacturing procedure at a new level during the whole product life. It is a completely automated digital production which is controlled in real-time by intelligence systems in constant interaction with external environment.*

**Keywords:** Industry 4.0; digital counterpart; MES; OEE and MCE coefficients.

Каждое современное предприятие проходит свой путь в трансформации к концепту четвертой промышленной революции Индустрия 4.0, а успешность такого перехода может оцениваться с помощью так называемого «индекса зрелости» (Maturity Index), разработанного Industrie 4.0 acatech.

В целом процесс перехода делится на несколько этапов. Наиболее интересным этапом (в рамках данной статьи) представляется этап «Обозримость» (Visibility), так как именно он отражает в себе создание виртуального двойника предприятия как его цифрового отображения. Последнее обеспечивается такими информационными системами как PLM (Product Lifecycle Management), ERP (Enterprise Resource Planning) и MES (Manufacturing Execution Systems). Основной же проблемой здесь является сбор достоверных данных, обеспечиваемый системами класса MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition) или SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), с использованием промышленного интернета (IoT - Internet of Things) [1, 2, 4].

Машиностроительная отрасль в данный момент находится в стремительном развитии, что предполагает баланс между использованием инноваций и своевременным выпуском продукции на рынок с сохранением бюджета. Чаще всего продукция, созданная на основе новых разработок, на этапе выпуска своих прототипов отражает ошибки, сделанные на этапе проектирования, что считается самым собой разумеющимся, как издержками использования новых технологий.

Цифровая трансформация предприятия – это преобразование структуры, процессов и бизнес-модели компании. На рис. 1 представ-

лены области трансформации и их направления. Понятие цифровой трансформации предприятия включает в себя рассматриваемые в данной работе «цифровые двойники» как самих изделий, так и производственной системы, в которой эти изделия изготавливаются [1, 9].

Понятие «цифрового двойника» (Digital Twin) является основой современного цифрового предприятия. Для более четкого понимания концепции использования «цифрового двойника» в производстве будем последовательно переходить от его описания к понятиям цифровой цепочки и «цифрового двойника» производственной системы на примере концепции «умного завода» (Smart Factory) [2, 4].

«Цифровой двойник» изделия – виртуальная 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», иллюстрация концепции цифрового двойника изделия показана на рис. 2.

Этап эскизного проектирования уже позволяет с помощью «цифрового двойника» создать множество вариантов разрабатываемого изделия для их оценки и выбора наилучшего из разнообразных технических решений. «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) [3, 4].

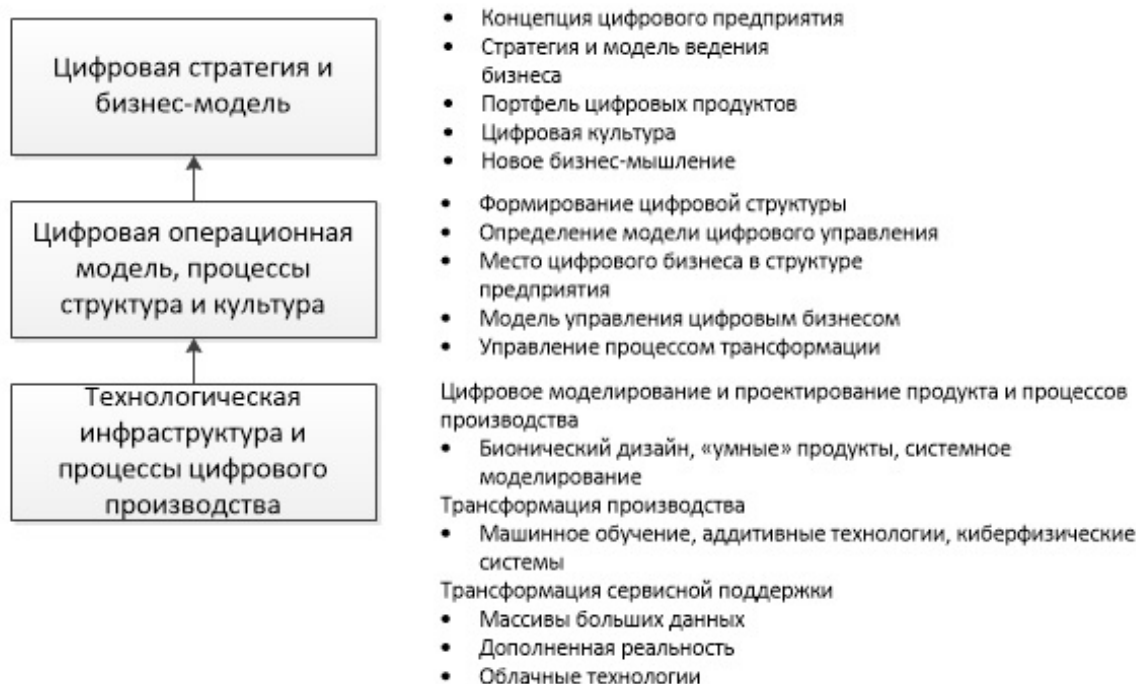


Рис. 1. Области информационной трансформации и их направления



Рис. 2. Концепция цифрового двойника изделия

На следующем этапе – этапе технического проектирования полученная модель может дорабатываться и уточняться, и именно в конце данного этапа получается конечный «цифровой двойник» изделия.

На этапе изготовления «цифровой двойник» изделия помогает определять требуемые допуски, характеристики и т.д.

На этапе эксплуатации изделия его «цифровой двойник» может быть использован для реализации обратной связи с разработкой и изготовлением изделий, диагностикой и прогнозированием неисправностей, повышением эффективности работы, перекалибровкой, выявления новых потребностей потребителя.

Таким образом, «цифровой двойник» изделия – это полномасштабная модель конкретного инженерно-технического объекта, которая получает результаты моделирования в максимально короткое время, что позволяет инженерам проводить всевозможные тесты, изменяя лишь введенные параметры. Данная технология обладает рядом преимуществ [2, 10]:

- виртуальный ввод в эксплуатацию – нет необходимости создавать сразу прототип, можно исследовать длительные и динамические нагрузки на цифровом двойнике;
- онлайн-диагностика – запуск «цифрового двойника» изделия вместе с реальным физическим объектом для диагностики

возникающих динамических изменений;

- виртуальные датчики – динамическая реакция «цифрового двойника» обусловлена определенными физическими законами, поэтому можно его использовать на этапе диагностики изделия для подмены неисправного датчика на время ремонта, либо для того, чтобы вообще исключить этот датчик из процесса;
- профилактическое обслуживание – влияние различных нагрузок на срок службы деталей и узлов моделируемого изделия;
- инструмент продаж – «цифровой двойник» изделия может быть использован для оценки требования заказчика.

Впоследствии на основании понятия цифрового двойника изделия появилось понятие «цифровая технологическая цепочка», которая объединяет в себе сотрудников, системы и оборудование, сохраняя актуальность информации на всех этапах изготовления деталей. Ее также называют «цифровым двойником» производственной системы.

Такой подход позволяет оптимизировать производственные процессы, снизить себестоимость и сократить сроки выполнения производственных заказов. Например, внесение изменений в конструкцию (на этапе использования «цифрового двойника» изделия) автоматически передается на все этапы процесса проектирования и изготовления, исключая ручной ввод данных [8]. Также повторное использование оптимальных рабочих процессов на этапе эксплуатации «цифрового двойника» производственной системы – это прямой путь к повышению производительности и качества [1, 9].

«Цифровой двойник» производственной системы включает в себя [4, 8]:

- 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 логической архитектуры предприятия, формирования планов-графиков изготовления изделий, межцеховой и внешней кооперацией, 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 сложным 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 «что если» путем математического моделирования производственных процессов.

Важнейшим требованием к производственной системе является возможность эффективного пооперационного планирования на основе многокритериальной оптимизации [6, 7].

Оперативное планирование цифрового производства осуществляется за счет расчета детального расписания выполняемых работ, которое формируется с использованием ряда альтернативных оптимизационных критериев [5].

На рис. 3 приведен пример критериев, используемых для составления производственных расписаний российской MES-системой «ФОБОС» (ИКИ РАН).

Цифровое моделирование и управление внутрицеховыми материальными потоками осуществляется средствами MES-систем в диспетчерском контуре управления. Для этих целей в online режиме контролируется текущее состояние производства. Для оценки эффективности цифрового производственного процесса используют два численных показателя [3, 7]:

- всеобщая эффективность станочной системы – коэффициент ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) – показатель плотности загрузки оборудования;
- эффективность операционного цикла – коэффициент МСЕ (Manufacturing Cycle Effectiveness) – показатель скорости обработки деталей и сборочных единиц в производственных подразделениях предприятия.

Общая эффективность оборудования является показателем, с помощью которого анализируется поведение «цифровой модели» производственной системы, в частности, измеряется доля планируемого производственного времени, которое приходится на изготовленные детали без учета незавершенного производства

Приведем формулу для расчета коэффициента ОЕЕ:

$$OEE = K_{вр} K_{пр} K_{кач} = \frac{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]}{\sum_j [\Phi_{врj}]} \times \frac{\sum_i [T_i \text{ Выр}_i]}{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]} \times \frac{\sum_i [T_i (\text{Выр}_i - Б_i)]}{\sum_i [T_i \text{ Выр}_i]}$$

где  $K_{вр}$  – коэффициент времени (доступность);  $K_{пр}$  – коэффициент производительности (эффективность работы);  $K_{кач}$  – коэффициент качества (уровень качества);  $j$  – количество единиц оборудования;  $\Phi_{врj}$  – фонд времени работы  $j$ -й единицы оборудования (время рабочей смены);  $Пр_j$  – простой  $j$ -й единицы обо-

рудования, в том числе плановые (ППР, наладка и пр.);  $i$  – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования;  $T_i$  – такт выпуска  $i$ -го продукта;  $Выр_i$  – количество изготовленного  $i$ -го продукта в ние  $\Phi_{вр}$ ;  $Б_i$  – количество брака  $i$ -го продукта изготовленного в течение  $\Phi_{вр}$ ;  $\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]$  – время, имеющееся для выпуска продукции на  $j$ -й единице оборудования;  $\sum_i [T_i * \text{Выр}_i]$  – количество времени, потраченного на производство продукции;  $\sum_i [T_i * (\text{Выр}_i - Б_i)]$  – количество времени, потраченного на производство годной продукции.

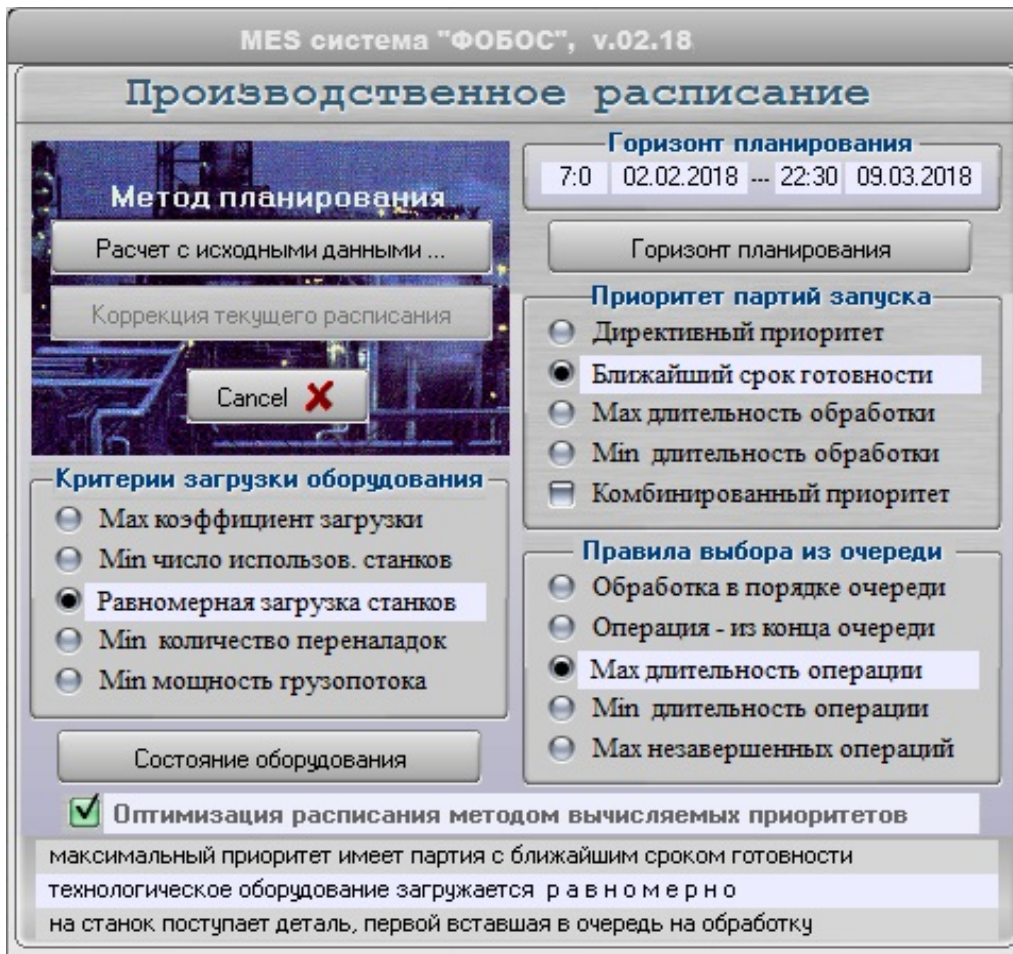


Рис. 3. Критерии расчета производственного расписания (многокритериальная оптимизация)

Коэффициент МСЕ – второй показатель, описывающий цифровую модель производства, вычисляется как отношение трудоемкости технологических операций, выполняемых при обработке изделий, к времени пребывания этих изделий в соответствующих производственных подразделениях.

Таким образом, если коэффициент ОЕЕ характеризует плотность загрузки технологического оборудования, моделируемого в цифре, то коэффициент МСЕ является характеристи-

кой скорости обработки выполняемых заказов, динамику материального потока в «цифровом двойнике» производственной системы.

Коэффициент МСЕ вычисляется по формуле [5, 6]:

$$МСЕ_{ik} = \frac{T_{ik} * \text{Выр}_{ik}}{\sum_j \Phi_{врj}}$$

где  $\text{Выр}_{ik}$  – выработка  $k$ -го производственного участка по деталям, входящим в  $i$ -й продукт;  $T_{ik}$  – такт выпуска  $i$ -й продукции на участке  $k$ ;

$F_{врj}$  – фонд времени работы  $j$ -й единицы оборудования.

Еще одним важным понятием, присущим «цифровому двойнику» – эксплуатационной модели производственной системы, является понятие текущего состояния обрабатываемого заказа. Для машиностроительных производств мелкосерийного и единичного типа типичным представлением такого состояния (состояния обработки заказа) может служить график пооперационной обработки деталей и сборочных единиц, входящих в заказ (рис. 4).

Значение коэффициента МСЕ является характеристикой скорости прохождения дета-

лей, входящих в конкретный заказ, через определенный производственный участок [3, 5].

В заключение можно сказать, что понятия «цифровой двойник», «цифровой процесс» и «цифровая производственная система» являются неразрывными и вытекающими друг из друга понятиями. Они являются одной из основ концепции «Индустрия 4.0», а именно ее третьего этапа [9, 10]. Использование подхода «цифровых двойников» позволит гарантированно изготавливать изделия, отвечающие всем требованиям заказчика, а также увеличить прибыльность и эффективность отечественных машиностроительных предприятий.

### СОСТОЯНИЕ ЗАКАЗА № 200.021/3

Обозначение ПС - 0006

Наименование изделия Кабина

Плановые сроки изготовления 17.10.2016 - 11.11.2016

Фактические сроки готовности 17.10.2016 - 15.11.2016 - отставание 4 дня

Запланировано партий / ДСЕ 39 / 107 количество операций 269

#### Расчетные сроки пооперационной обработки ДСЕ заказа на 23.10.2016

Код наименования операции	кол-во	трудоемкость	начало - окончание	отработано	МСЕ
0418 комплектование	1	0,02 час.	10.11.2016 - 10.11.2016	0,00 %	100
0108 слесарная обработка	43	110,88 час.	17.10.2016 - 14.11.2016	10,40 %	67,47
4110 токарная чистовая	9	21,75 час.	20.10.2016 - 14.11.2016	18,77 %	45,82
4131 круглошлифовальная	15	10,18 час.	21.10.2016 - 14.11.2016	10,97 %	27,24
4130 пл.шлифовальная чистовая	25	23,65 час.	21.10.2016 - 15.11.2016	3,88 %	41,83
4142 заточная	1	1,58 час.	15.11.2016 - 15.11.2016	0,00 %	100
9170 термическая резка	13	8,60 час.	18.10.2016 - 18.10.2016	100,00 %	100
5010 термообработка (отжиг)	10	170,00 час.	18.10.2016 - 19.10.2016	100,00 %	100
4260 фрезерная черновая	25	55,00 час.	19.10.2016 - 31.10.2016	50,24 %	59,3
4130 пл.шлифовальная черновая	17	16,70 час.	20.10.2016 - 03.11.2016	19,36 %	42,6
5030 термообработка (закалка)	36	612,00 час.	19.10.2016 - 07.11.2016	16,67 %	100
4223 координатно-расточная	15	74,30 час.	26.10.2016 - 10.11.2016	0,00 %	61,26
5050 термообработка (отпуск)	4	68,00 час.	18.10.2016 - 24.10.2016	75,00 %	100
4234 фрезерная с ЧПУ	7	75,60 час.	21.10.2016 - 08.11.2016	0,00 %	67,38
7500 электроэрозионная	2	18,00 час.	07.11.2016 - 08.11.2016	0,00 %	76,47
4260 фрезерная чистовая	5	11,65 час.	24.10.2016 - 04.11.2016	0,00 %	39,57
4285 пило-отрезная	23	19,02 час.	18.10.2016 - 19.10.2016	100,00 %	100
4110 токарная черновая	17	27,12 час.	20.10.2016 - 21.10.2016	100,00 %	100
4132 внутришлифовальная	1	0,58 час.	25.10.2016 - 25.10.2016	0,00 %	100
<b>Итого:</b>	<b>269</b>	<b>1324,63 час.</b>	<b>17.10.2016 - 15.11.2016</b>	<b>31,86 %</b>	
Без учета кооперации:	219	474,63 час.	Готовность в среднем на	47,32 %	52,89

Частично запланированных партий ДСЕ нет  
 Текущий дефицит ДСЕ нет  
 Эффективность операционного цикла (МСЕ) 52,89 %

Рис. 4. Пример текущего состояния производства (состояние заказа)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломенцев, Ю.М., Фролов, Е.Б. «Цифровой двойник» производственной системы – перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия // Станочный парк. – 2018. – № 8. – С. 36-39.
2. Грюнвальд, А. Создание цифрового завода будущего // САПР и графика. – 2018. – № 3. – С. 68-69.
3. Фролов, Е.Б., Залыгин, А.Р., Нестеров, А.В. Исполнительные производственные системы – инструмент эффективного управления машиностроительным предприятием // Генеральный директор. – 2013. – №2. – С. 76-79.
4. Соломенцев, Ю.М., Фролов, Е.Б. «Цифровой двойники» изделия и производственной системы // Генеральный директор. – 2018. – № 8. – С. 18-25.
5. Фролов, Е.Б., Загидуллин, Р.Р. MES-системы как они есть или эволюция систем планирования производства // Генеральный директор. – 2008. – № 4. – С. 84-91.
6. Zagidullin R., Frolov E. Control of manufacturing production by means of MES systems // Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, No. 2, pp. 166–168. Allerton Press, Inc., 2008.
7. Фролов, Е.Б., Загидуллин, Р.Р. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах // Станочный парк. – 2008. – № 11. – С. 22-27.
8. Долгов, В.А., Кабанов, А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – №4. – С. 178-184.
9. Ингеманссон, А.Р. Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 8(86). – С. 25-32.
10. Цифровые двойники: создание интеллектуальной продукции – своевременно и в рамках бюджета [Электронный ресурс] // Rockwell Automation. – 2018. Режим доступа: <https://www.rockwellautomation.com>. – (Дата обращения: 27.10.2018).

## REFERENCES

1. Solomentsev, Yu.M., Frolov, E.B. “Digital counterpart” of production system – promising tool for machinery effectiveness increase of engineering enterprise // *Machinery*. – 2018. – No.8. – pp. 36-39.
2. Gruenwald, A. Formation of future digital enterprise // *CAD and Graphics*. – 2018. – No.3. – pp. 68-69.
3. Frolov, E.B., Zalygin, A.P., Nesterov, A.V. Executive production systems – tool of efficient control of engineering enterprise // *Director General*. – 2013. – No.2. – pp. 76-79.
4. Solomentsev, Yu.M., Frolov, E.B. “Digital counterparts” of product and production system // *Director General*. – 2018. – No.8. – pp. 18-25.
5. Frolov, E.B., Zagidullin, R.R. MES-systems as they are or evolution of production planning system // *Director General*. – 2008. – No.4. – pp. 84-91.
6. Zagidullin R., Frolov E. Control of manufacturing production by means of MES systems // *Russian Engineering Research*, 2008, Vol. 28, No. 2, pp. 166–168. Allerton Press, Inc., 2008.
7. Frolov, E.B., Zagidullin, R.R. Operational and calendar planning and managing in MES-systems // *Machinery*. – 2008. – No.11. – pp. 22-27.
8. Dolgov, V.A., Kabanov, A.A. Basic approaches to information model formation of production-technological system of engineering enterprise // *Automation. Modern Technologies*. – 2018. – No.4. – pp. 178-184.
9. Ingemansson, A.R. Characteristics, structure, mechanisms of functioning and modern aspects of digital production system introduction in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.8 (86). – pp. 25-32.
10. Digital Counterparts: creation of intelligent products – timely and within budget [Electronic resource] // Rockwell Automation. – 2018. Access mode: <https://www.rockwellautomation.com>. – (Address date: 27.10.2018).

Рецензент д.т.н. Е.А. Саксонов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"  
 Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
 Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru  
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 10.01.2019. Выход в свет 28.02.2019.  
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.  
 Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии  
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
 "Брянский государственный технический университет"  
 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16