

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.4.005

УДК 681.5

## Исследование методов оптимизации сборочных процессов дефибрилляционного оборудования

О. О. Подоляк<sup>1</sup> ✉, В. А. Овчинникова<sup>1</sup>, С. Н. Селяхов<sup>2</sup>,  
Т. Г. Кормин<sup>1</sup>, А. В. Корежатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

<sup>2</sup> АО «ПО «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова», Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33б

✉ o.o.podoliak@urfu.ru

### Аннотация

Процесс разработки радиоэлектронного оборудования медицинского назначения включает в себя проблемы и задачи совершенствования технических характеристик медицинских приборов, использования альтернативных физических методов регистрации медицинской информации и так далее. К радиоэлектронному оборудованию медицинского назначения относится дефибрилляционная техника различного класса, модернизация которой неразрывно связана с научными и техническими исследованиями в области физики, схемотехники, конструкции, технологии, моделирования, измерения характеристик, а также медицины. Одно из направлений междисциплинарных исследований на стыке кардиологии и инженерии состоит в разработке новых и совершенствовании существующих дефибрилляционных приборов, повышении их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также их эффективности применения, что необходимо для оказания расширенных реанимационных мероприятий. Настоящая статья посвящена исследованию и моделированию эксплуатационных характеристик дефибриллятора с учетом надежности составных частей изделия и определения эксплуатационной интенсивности отказов. Также в статье приведено исследование методов оптимизации производственного процесса, в частности сборочных операций высокотехнологичной дефибрилляционной продукции, где поиск оптимизационных решений проводился с использованием имитационного моделирования.

### Ключевые слова

надежность, имитационное моделирование, сборочные операции, дефибрилляционное оборудование, оптимизация, высокотехнологичная продукция

### Для цитирования

Подоляк О. О., Овчинникова В. А., Селяхов С. Н., Кормин Т. Г., Корежатов А. В. Исследование методов оптимизации сборочных процессов дефибрилляционного оборудования. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(4):410–431. DOI: 10.15826/urej.2021.5.4.005.

© Подоляк О. О., Овчинникова В. А., Селяхов С. Н., Кормин Т. Г., Корежатов А. В., 2021

## Optimization methods of assembly processes of defibrillation equipment

O.O. Podoliak<sup>1</sup> ✉, V.A. Ovchinnikova<sup>1</sup>, S.N. Selyahov<sup>2</sup>,  
T.G. Kormin<sup>1</sup>, A.V. Korejatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin, 32 Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russia

<sup>2</sup> Joint Stock Company “Production Association “Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E.S. Yalamov”, 33 B Vostochnaya Str., Yekaterinburg, 620100, Russia

✉ o.o.podoliak@urfu.ru

### Abstract

The electronic medical equipment developing process includes the problems and tasks of medical devices' technical characteristics improvement, using alternative physical methods of recording medical information. Medical electronic equipment includes defibrillation equipment of various classes, the modernization of which is inextricably connected with scientific and technical research in the field of physics, circuit engineering, design, technology, modeling, characteristics' measurement, as well as medicine. One of the interdisciplinary research areas at the cardiology and engineering issue is the development of new and modernisation of existing defibrillation devices, improving their functional and operational characteristics, as well as their application efficiency, which is necessary for the provision of extended resuscitation measures. This research is devoted to the research and modeling of defibrillator performance characteristics taking into account components reliability and the operational failure rate determination. The paper also contains study of the production process optimizing methods, in particular assembly operations of high-tech defibrillation products, where the search of optimization solutions was carried out using simulation modeling.

### Keywords

simulation moderation, assembly operations, defibrillation equipment, optimization, high-tech products

### For citation

Podoliak O.O., Ovchinnikova V.A., Selyahov S.N., Kormin T.G., Korejatov A.V. Optimization methods of assembly processes of defibrillation equipment. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(4):410–431. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.4.005.

### Введение

Исследование и моделирование эксплуатационных характеристик дефибриллятора с учетом надежности составных частей изделия представляется актуальным, в том числе из-за высоких эксплуатационных требований по надежности изделия.

На сегодняшний день существует несколько методик для оценки безотказности сложных технических изделия [1–3]. Од-

нако, чтобы оценить безотказность по уже известным методикам необходимо идентифицировать большое количество технических параметров, которые не всегда доступны для сравнения. В настоящее время происходит снижение сроков на разработку и производство продукции и, как следствие, снижение времени проведения предварительных испытаний. Часто даже нет возможности повторно провести испытание после обнаружения и устранения дефекта или ошибки проектирования. Это предъявляет высокие требования по скорости и точности проведения оценки безотказности на этапе проектирования.

По ГОСТ 27.002-89, безотказность является свойством объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Основным показателем безотказности для сравнения предлагается рассматривать интенсивность отказов, которая не зависит от длины интервала времени эксплуатации, и от этого показателя можно без труда перейти к вероятности безотказной работы и наработке [4–6].

Актуализация традиционных методов планирования описана в работах многих авторов, среди предлагаемых методик можно выделить использование информационных систем [7–10], адаптацию ранее разработанных методик к современным условиям [11–18], использование графа-аналитических инструментов [19; 20], в целом все описанные методики можно охарактеризовать как автоматизацию сбора данных для использования в традиционных (модернизированных) алгоритмах «ручного» расчета. Использование методов машинного (программного) планирования основано на моделировании и оптимизации процесса за счет использования математической статистики [17], сценарного планирования [20], анализа данных [21–23], а также построения моделей на основе проведенного анализа.

### **Исходные данные и методология**

При анализе сложившейся системы организации производства и труда на сборочном участке был выявлен ряд проблем, таких как высокий уровень межоперационного пролеживания (что увеличивает цикл сборки), неэффективный метод транспортировки деталей (организация работы вспомогательных рабочих, производственная планировка цеха), неэффективный метод специализации рабочих мест (широкая специализация связанная с технологическим методом разделения труда и технологического процесса), большой объем незавершенного производства (в виде технологических межоперационных заделов), что, в свою очередь, может оказывать влияние на надежность работы всего аппарата в целом при его

дальнейшей эксплуатации. При планируемом росте объемов производства и внедрении новой продукции (новых модификаций производимой продукции) сложившаяся система не позволит добиться желаемых результатов вследствие низкой пропускной способности. Все вышеизложенное требует изменение принципиального подхода к выбору методов оптимизации планирования и организации сборочных операций технологического процесса при реализации многопредметного поточного производства.

Исходя из вышеизложенной цели исследования и выявленных проблем производственного подразделения исследование велось параллельно в следующих направлениях: оценка надежности дефибрилляционной аппаратуры по статистическим данным ее надежности; поиск оптимизационных решений, связанных с организацией производства в сборочном цехе; выявление зависимости показателей надежности изделия от уровня организации производства.

Оценка надежности радиоэлектронной аппаратуры по показателям надежности входящих в нее элементов. Алгоритм проведения исследования:

1. Определение интенсивности отказов оборудования.
2. Выявление факторов, влияющих на надежность работы оборудования.
3. Расчет влияния факторов.
4. Оценка коэффициентов, определяющих влияние окружающей среды, качества испытаний и типа корпуса.
5. Расчет эксплуатационной интенсивности отказов.

Для выполнения расчетов был собран массив данных об отказах дефибрилляционного оборудования, включающий такие данные, как наработку на отказ, эксплуатационные характеристики, показатели внешней среды.

Оценка нового оборудования выполняется по результатам надежности компонентов, так как большинство изделий унифицировано и показатели надежности которых известны по результатам предыдущих исследований.

Изделие рассматривается как система, состоящая из определенного числа элементов, отказ хотя бы одного компонентов нарушает работоспособность всей системы. Такое соединение, с точки зрения надежности, называется последовательным. Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов есть вероятность того, что безотказно будут работать все элементы.

При расчете надежности системы и ее составных частей учитывают только те отказы, которые носят случайный и незави-

симый характер (нельзя предусмотреть или не вызваны отказами других входящих в систему элементов).

Вероятность наступления нескольких независимых случайных событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_1(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (1)$$

где  $P_c(t)$  – вероятность безотказной работы системы;  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Для периода времени  $t_1 \leq t \leq t_2$ , где интенсивность отказов является постоянной величиной ( $\lambda = \text{const}$ ) интенсивность отказов системы с последовательным соединением элементов равна сумме интенсивностей отказов входящих в нее элементов:

$$\lambda_c = N_1\lambda_1 + N_2\lambda_2 + \dots + N_m\lambda_m = \sum_{i=1}^m N_i\lambda_i, \quad (2)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов элементов  $i$ -го элемента;  $N_i$  – число элементов с интенсивностью отказов  $\lambda_i$ ;  $\lambda_c$  – интенсивность отказов системы.

Вероятность безотказной работы системы в соответствии с формулой:

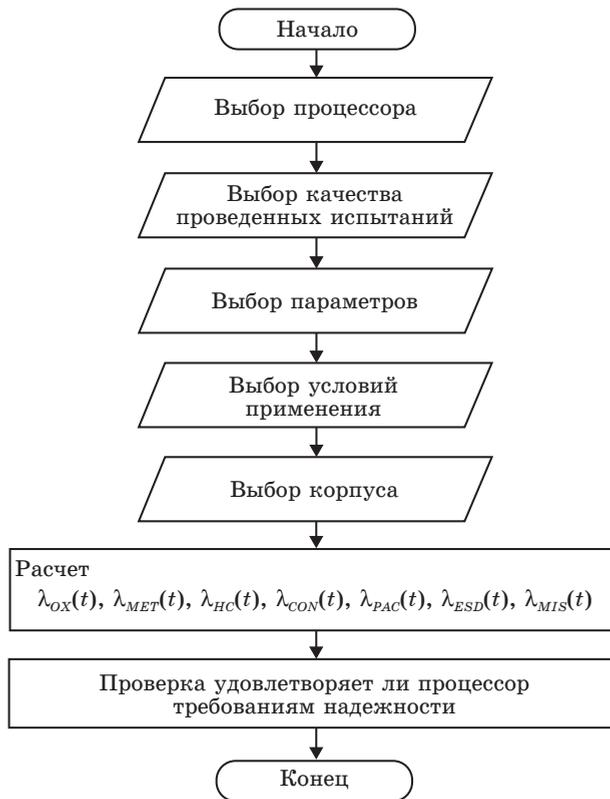
$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}. \quad (3)$$

Среднее время безотказной работы системы вычисляется по формуле:

$$T_c = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c t} dt = \frac{1}{\lambda_c}. \quad (4)$$

Создание алгоритма оценки безотказности интегральных микросхем по конструктивно-технологическим параметрам на основе «RADC-TR-89-177».

Поиск оптимизационных решений проводился с использованием имитационного моделирования. После анализа существующих методик оптимизации и планирования работы сборочного подразделения промышленного предприятия был сформирован список параметров, влияющих на выполнение плана производства, собран массив данных, необходимый для проведения имитационного моделирования. В выборку попали данные по производству более 1000 экземпляров, в том числе в выборку включена сборка разработанного высокотехнологичного изделия гражданского назначения (изделие для восстановления функций сердца – дефибриллятор). В качестве параметров, влияющих на производительность, рассматривались такие, как загрузка (простои) оборудования, уровень энергопотребления, использование ресурсов, уровень брака, занятость (простои) рабочих и т.д.



**Рис. 1.** Алгоритм расчета эксплуатационной интенсивности отказов  
**Fig. 1.** Operating failure rate calculation algorithm

Оптимизация процессов современных предприятий требует значительных затрат на расчет параметров эффективности производства. В качестве упрощения этих процессов применяются имитационное моделирование, включающее в себя различные типы производств и множество стохастических параметров. Hysys, Aspen Plus, CHEMCAD являются одними из ведущих комплексов для моделирование химических процессов. Если производственная задача выходит за пределы одной отрасли, то наиболее подходящими программными обеспечениями будут AnyLogic и Tecnomatix Plant Simulation.

По результатам анализа было выбрано ПО Plant Simulate, наиболее отвечающее целям проводимого исследования. Имитационное моделирование с использованием Plant Simulate проводилось для групп изделий, находящихся в сборочном подразделении с целью выявления возможности увеличения производительности подразделения, а также внедрения в производство новой продукции.

Выявление зависимости показателей надежности изделия от уровня организации производства проводилось путем построения корреляционной зависимости надежности изделия от факторов эксплуатации и организации производства.

### Результаты исследования

В таблице 1 приведена интенсивность отказов блоков дефибрилятора.

Таблица 1. Интенсивность отказов блоков дефибриллятора

Table 1. Failure rates of defibrillator units

№ блока	Наименование блока	Интенсивность отказов
1	Съемная память	24,04
2	Системы связи	25,3
3	Клавиатура и органы управления	24,12
4	Схема управления питанием	2,58
5	Высоковольтные схемы	16,01
6	Центральный процессор	4,15
7	Входные преобразователи	16,64
8	Коммутирующая логика	13,56
9	Дисплей	16,96
10	Звуковая сигнализация	10,29
11	Постоянная память	17,47
12	Связная шина	29,38
13	Динамик	62,91

Среднее время безотказной работы составляет 379 ч, тогда  $P_c(t) \approx 0,4$ .

На основании приведенных в разделе 1 формул был проведен анализ зависимости вероятности безотказной работы аппаратуры от времени.

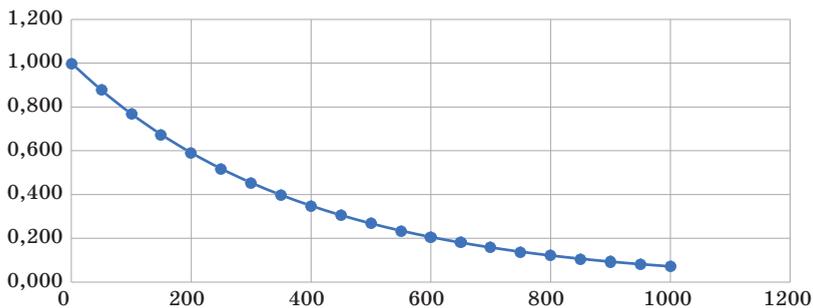


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы аппаратуры от времени

Fig. 2. Time dependence of probability from equipment failure-free operation

Расчет безотказности СБИС на основе полученного алгоритма.  
Расчет эксплуатационной интенсивности отказов:

1. Расчет интенсивности отказов, зависящий от типа ИМС

$$\lambda_{bd} = 0,02.$$

2. Расчет зависит от процесса производства ИМС

$$\pi_{mfg} = 0,55.$$

3. Расчет коэффициента, зависящего от температуры:

Необходимые данные для расчета  $\pi_t$ :

$\theta_c = 5,5$  – тепловое сопротивление кристалла-корпуса (С/Вт).

$T_c = 30$  – температура корпуса (С).

$T_0 = 25 + 273$  – номинальная температура кристалла (К).

$P = 0,09165$  мощность рассеивания (Вт)

$$T_t = T_c + \theta_c \cdot P$$

$T = T_t + 273$  – Рабочая температура кристалла

$$\pi_t = e^{\frac{-0,33}{8,617 \cdot 10^{-5}} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} = 1,262452974.$$

4. Расчет коэффициента, зависящего от уровня качества проведенных испытаний кристалла

$$\pi_{sd} = 0,85.$$

5. Расчет коэффициента, зависящего от сложности структуры кристалла

$A = 1,32$  – площадь кристалла (см<sup>2</sup>).

$X_s = 0,180$  – топологический размер (мкм).

$$\pi_{cd} = \left[ \frac{A}{0,21} \left( \frac{2}{X_s} \right)^2 \right] 0,64 + 0,36 = 497,009.$$

6. Расчет  $\lambda_{bp}$ , интенсивности отказов.

$N = 144$  – количество выходов

$$\lambda_{bp} = 0,0024 + (1,85 \cdot 10^{-5}) \cdot N = 5,064 \cdot 10^{-5}.$$

7. Расчет коэффициента, зависящего от воздействия окружающей среды,

$$\pi_e = 0,52.$$

8. Расчет коэффициента, зависящего от качества проведенных испытаний корпуса,

$$\pi_q = 1.$$

9. Расчет коэффициента, зависящего от типа корпуса,

$$\pi_{pt} = 4.$$

10. Расчет интенсивности отказов, связанных с ESD,

$$\lambda_{eos} = 0,048.$$

11. Рассчитываем эксплуатационную интенсивность отказов

$$\lambda_P = (\lambda_{bd} \cdot \pi_{mfg} \cdot \pi_t \cdot \pi_{sd} \cdot \pi_{cd} + \lambda_{bp} \cdot \pi_e \cdot \pi_q \cdot \pi_{pt} + \lambda_{eos}) \cdot 10^{-6} = 9,394 \cdot 10^{-8}.$$

Таким образом, была определена эксплуатационная интенсивность отказов, на основании которой можно делать выводы о надежности разрабатываемого изделия.

С использованием ПО Plant Simulate была смоделирована существующая система производства на основе статистических данных, собранных при анализе производства. На рис. 3 представлена схема сборочного процесса дефибриллятора.

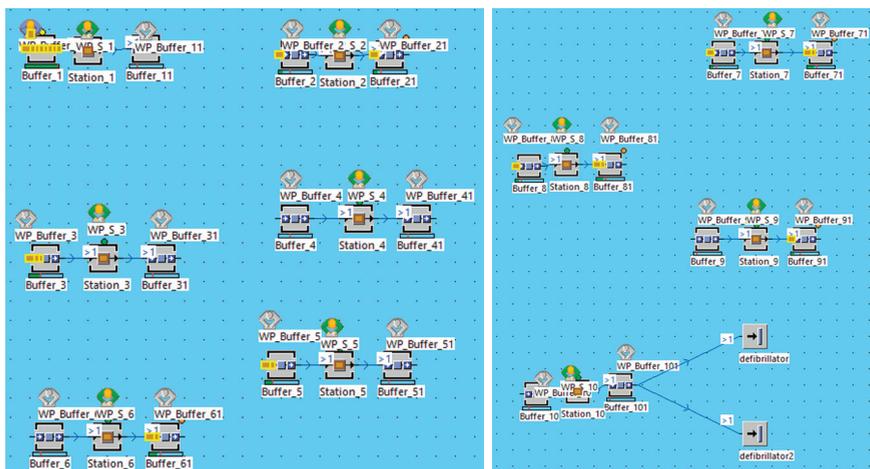


Рис. 3. Схема сборочного процесса дефибриллятора

Fig. 3. Defibrillator assembly flow chart

Процесс симуляции (имитационного моделирования) позволяет отследить процесс сборки в заданном временном промежутке. Для целей построения модели был определен период в 20 рабочих дней (календарный месяц), длительность смены – 8 часов, режим работы – односменный. Запуск процесса симуляции (имитационного моделирования) с учетом статистических данных работы подразделения (загруженных в качестве исходных данных и условий при моделировании) дал возможность оценить эффективность работы всей системы, в том числе были получены данные по загрузке рабочих мест и буферных зон (складов комплектующих, межоперационных технологических запасов и заделов), пролеживанию деталей, энергопотреблению, загрузке рабочих.

В ходе моделирования была получена статистика по загрузке рабочих мест (рис. 4) и технологических межоперационных заделов (буферов), т. е. уровня незавершенного производства (рис. 5).

Кроме того, получены данные о ходе реализации сборочного процесса (рис. 6, 7).

State Statistics

Объект	Работа	Переналадка	Ожидание	Блокировка	Включение/выключение	Отказал	Остановлен	Пауза	Перерыв	Часть
Buffer_1	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_10	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_101	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_11	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_2	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_21	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_3	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_31	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_4	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_41	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_5	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_51	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_6	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_61	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_7	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_71	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_8	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_81	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_9	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer_91	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_1	99.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.91%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_10	93.22%	0.00%	5.64%	0.00%	0.00%	1.15%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_2	98.55%	0.00%	0.47%	0.00%	0.00%	0.98%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_3	97.94%	0.00%	1.05%	0.00%	0.00%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_4	97.18%	0.00%	1.87%	0.00%	0.00%	0.95%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_5	96.98%	0.00%	2.03%	0.00%	0.00%	0.99%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_6	95.73%	0.00%	3.27%	0.00%	0.00%	1.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_7	95.56%	0.00%	3.42%	0.00%	0.00%	1.02%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_8	95.00%	0.00%	4.08%	0.00%	0.00%	0.92%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station_9	93.79%	0.00%	5.22%	0.00%	0.00%	0.99%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
defibrillator	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
defibrillator2	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Рис. 4. Статистика загрузки рабочих мест и буферов незавершенного производства

Fig. 4. Work center load and work-in-progress buffer statistics

Статистика использования буферов

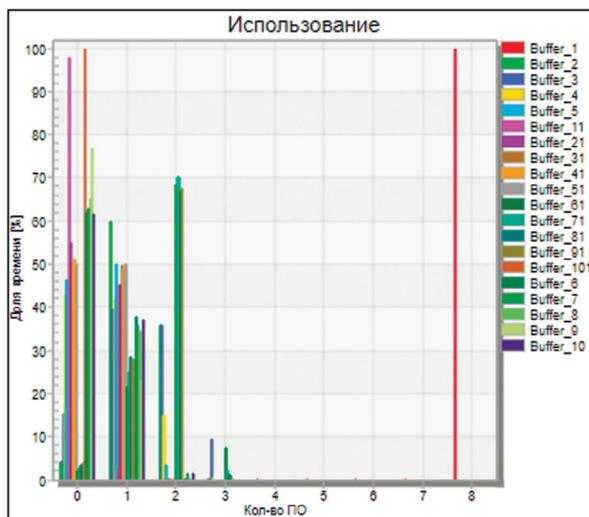


Рис. 5. Статистика загрузки буферов незавершенного производства

Fig. 5. Work-in-progress buffer occupancy statistics

О. О. Подляк, В. А. Овчинникова, С. Н. Селяхов, Т. Г. Кормин, А. В. Корехатов | Исследование методов оптимизации сборочных процессов дефибриляционного оборудования

### Drain Statistics

Имя	Среднее время жизни	Пропускная способность	Выработка в час	Производство	Транспорт	Хранение	Добавленная стоимость	Часть
defibrillator	1:22:13:26.8777	382	0.53	38.04%	6.81%	55.15%	34.27%	

.Models.Model.defibrillator

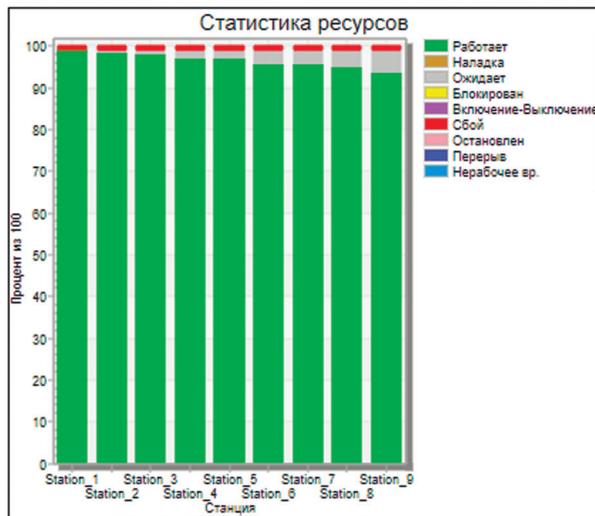
Имя	Среднее время жизни	Пропускная способность	Выработка в час	Производство	Транспорт	Хранение	Добавленная стоимость	Часть
defibrillator2	1:22:10:21.9993	43	0.06	37.91%	6.77%	55.32%	34.15%	

.Models.Model.defibrillator2

ПО	Частота	Кол-во	Имя	Атрибуты
.MUS.Part	90.00	20	defibrillator	
.MUS.Part	10.00	2	defibrillator2	

**Рис. 6.** Статистические показатели выполнения производственного процесса сборки  
**Fig. 6.** Statistical indicators of the assembly production process

### Статистика ресурсов



**Рис. 7.** Статистика загрузки рабочих мест  
**Fig. 7.** Workplace occupancy statistics

Результаты моделирования имеющегося процесса сборки высокотехнологичного изделия для восстановления функций сердца показали низкую эффективность методов организации производства, в том числе большой уровень незавершенного производства, связанный с пролеживанием деталей и комплектующих в виде межоперационных технологических заделов, неэффективность работы сборочных участков при многопредметной технологической специализации рабочих мест.

С целью повышения эффективности производства: обеспечение роста объема производства, производительности высокотехнологичных рабочих мест, а также обеспечение возможности

расширения номенклатуры (производство новой или модифицированной продукции) – было предложено организовать однопредметную производственную линию, организованную поточным методом. Имитационное моделирование в данном случае позволит на этапе планирования оценить возможный результат реорганизации производственного процесса сборочных операций.

Результаты симуляции процесса оптимизации сборочных операций дефибрилляционного оборудования представлены ниже. В ходе имитационного моделирования была разработана новая схема компоновки сборочного участка с применением принципа параллельности выполнения отдельных операций производственного процесса (рис. 8).

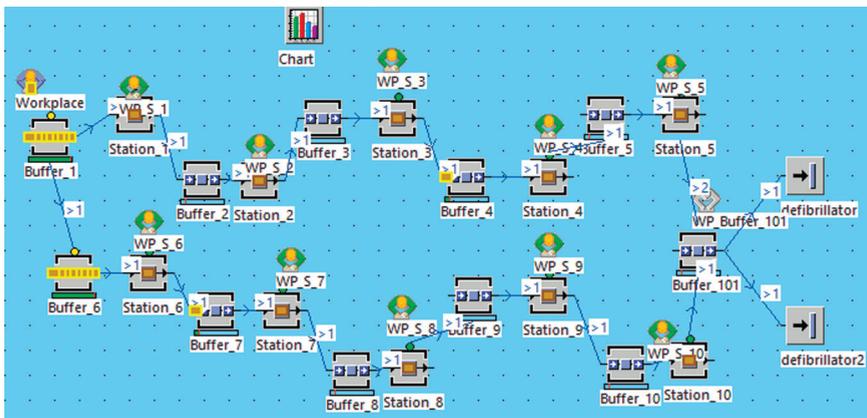


Рис. 8. Оптимизированная схема сборочного процесса дефибриллятора

Fig. 8. Optimized defibrillator assembly flow chart

Применение имитационного моделирования уже на этапе планирования позволяет оценить не только расчетную эффективность предлагаемых изменений, но и в режиме «реального времени» увидеть новый процесс, оценить преимущества и недостатки предлагаемого метода на основе наблюдения за работающей (динамической, а не статичной) моделью, а также выявить проблемные зоны (например, узкие места производственного процесса) и оперативно внести коррективы в модель (например, за счет установки дополнительного оборудования или за счет оптимизации работы вспомогательных рабочих).

Результаты моделирования показали сокращение простоев рабочих мест (рис. 9), а также оптимизацию загрузки буферов незавершенного производства (рис. 10).

В результате предлагаемой оптимизации сборочного участка можно говорить о комплексном повышении эффективности производственного процесса (рис. 11), в том числе повысилась

загрузка рабочих мест и их производительность, сократилась загрузка буферов (сокращение незавершенного производства), увеличилась пропускная способность линии (обеспечение возможности расширения производственной программы за счет вновь разработанного или модернизированного продукта).

### Статистика ресурсов

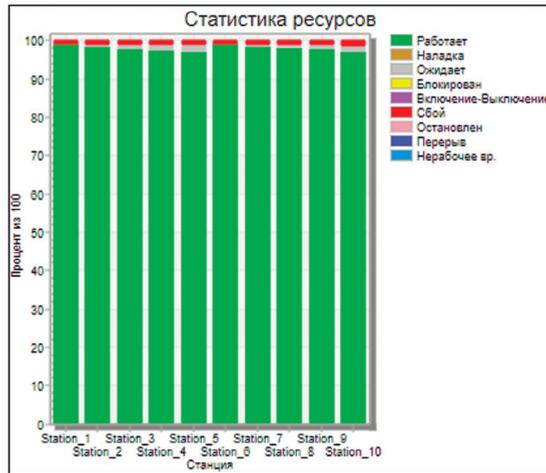


Рис. 9. Загрузка рабочих мест после оптимизации

Fig. 9. Optimized workplace occupancy statistics

### Загрузка буферов

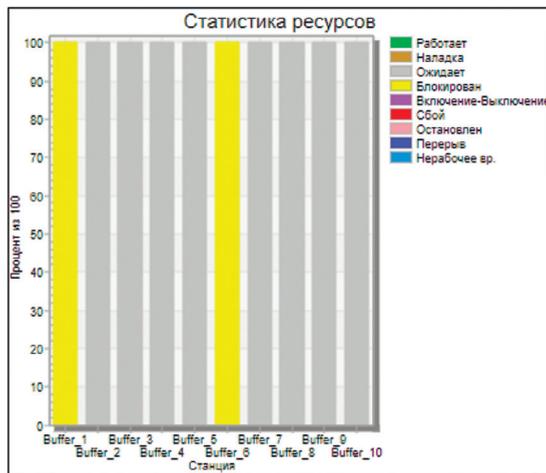


Рис. 10. Загрузка буферов незавершенного производства после оптимизации

Fig. 10. Work-in-progress buffer occupancy statistics after optimization

## Drain Statistics

Имя	Среднее время жизни	Пропускная способность	Выработка в час	Производство	Транспорт	Хранение	Добавленная стоимость	Часть
defibrillator	1:10:43:03.6448	406	0,56	49.17%	4.49%	46.33%	44.48%	

.Models.Model.defibrillator

Имя	Среднее время жизни	Пропускная способность	Выработка в час	Производство	Транспорт	Хранение	Добавленная стоимость	Часть
defibrillator2	1:16:53:27.3438	45	0,06	42.68%	2.95%	54.37%	37.77%	

.Models.Model.defibrillator2

ПО	Частота	Кол-во	Имя	Атрибуты
MUs.Part	90.00		defibrillator	
MUs.Part	10.00		defibrillator2	

**Рис. 11.** Статистические показатели выполнения производственного процесса сборки после модернизации  
**Fig. 11.** Statistical indicators of the assembly production process after optimization

Цифровизация процесса планирования производства промышленного предприятия, как показало проведенное исследование, позволяет не только выбрать наиболее эффективный метод оптимизации производственного процесса, но и в режиме реального времени оценить работу предполагаемой, еще не запущенной системы, что сокращает сроки процесса оптимизации, позволяет определить и устранить ошибки уже на этапе планирования и прогнозирования, а также существенно сокращает расходы на подготовку производства.

Надежность изделия – параметр, на который оказывают влияние разнообразные факторы, не только связанные с надежностью комплектующих, но и такие как организация производства. Для оценки зависимости показателей надежности изделия от параметров был сформирован массив данных, включающих как безотказность комплектующих, так и параметры организации работы сборочных подразделений производственного предприятия (фрагмент данных приведен в табл. 2).

**Таблица 2.** Фрагмент массива данных для оценки корреляционной зависимости параметров

**Table 2.** Fragment of the data array for estimating the correlation dependence of steam meters

№ п/п	Значение факторов										Интенсивность отказов (время простоя)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	2	1	0	2	1	1	0	0	2	0	6,516
2	0	0	0	0	2	0	0	1	2	3	5,577
3	1	0	0	0	2	0	0	1	2	3	6,337
4	3	0	0	0	2	0	0	1	2	3	6,501

Степень влияния, включенных в модель параметров, оценивалась в рамках исследования путем статистической обработки данных – построения корреляционной зависимости.

Расчет базируется на следующих допущениях:

1. Все изделия, по которым анализируется статистический материал, одинаково надежны.

2. Отказ любого изделия является событием случайным. Для этого изделия должны проработать время, достаточное для приработки элементов, но недостаточное для наступления периода их старения.

3. Эксплуатация (испытания) изделий проходила в одинаковых условиях, поэтому исходные данные не нуждаются в корректировке за счет влияния климатических, механических и иных факторов.

Построенная корреляционная модель представлена в табл. 3.

**Таблица 3.** Корреляционная зависимость показателей

**Table 3.** Correlation dependence of indicators

	Строка 1	Строка 2	Строка 3	Строка 4
Строка 1	1			
Строка 2	0,683623	1		
Строка 3	0,75453	0,984472	1	
Строка 4	0,773089	0,892167	0,955539	1

Полученные результаты говорят о высоком влиянии как эксплуатационных параметров, так и уровня организации производства на надежность дефибрилляционного оборудования.

## Дискуссия и выводы

Неотъемлемой частью создания высокотехнологичного производства медицинских изделий для восстановления функции сердца является проведение системного анализа существующих алгоритмов и методов определения шоковых ритмов сердца, необходимых для минимизации вероятности нанесения разряда дефибриллятора пациенту с нормальным сердечным ритмом [24]. Следует отметить, что помимо учета надежности составных частей изделия и определения эксплуатационной интенсивности отказов необходимо оценивать эффективность разработанных алгоритмов детектирования QRS-комплексов для проведения процедуры кардиоверсии, в котором обеспечивается высокая степень синхронизации R-зубца с импульсом дефибриллятора. Расчет надежности алгоритмов дефибрилляции на базе обработки и анализа биомедицинских сигналов [25; 26] может быть вынесен в отдельное исследование.

Полученные в ходе исследования результаты расчета зависимости вероятности безотказной работы аппаратуры от времени

с учетом интенсивности демонстрируют низкий уровень эксплуатационной интенсивности отказов за счет оптимальной компоновки блоков дефибрилляционного оборудования.

Также результаты исследования методов оптимизации сборочных операций высокотехнологичной дефибрилляционной продукции с использованием имитационного моделирования демонстрируют повышение эффективности производственного процесса и производительности рабочих мест.

Следует отметить, что имитационное моделирование и его применение в процессе организации производства является одним из первых шагов на пути создания полноценного цифрового двойника промышленного предприятия, что позволит на уровне модели оценивать возможности производства, искать пути его оптимизации, повышения производительности, сокращения брака и простоев оборудования и рабочих, увеличения объема производства, а также планировать внедрение в производство новой продукции. Кроме того, имитационное моделирование позволяет сформировать не только схематическую копию существующего и планируемого производственных процессов, но и создавать 3D-модели, что, в свою очередь, наглядно демонстрирует в реальном времени работу производственного персонала, загрузку и расстановку оборудования, маршруты движения деталей и комплектующих, рабочих, транспортировочных систем и так далее. Все вышеперечисленное позволяет уже на уровне модели оценить эффективность предложенной модели не только с точки зрения эффективности производственного процесса, но и сточки зрения требований и норм пространственной и временной организации производственного процесса.

### **Благодарности**

Благодарим за содействие АО «ПО «УОМЗ», в главного конструктора конструкторского бюро медицинской техники Чупова Алексея Александровича. Данная статья является частью работы, посвященной реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства медицинских изделий для восстановления функции сердца в обеспечение общедоступной дефибрилляции».

### **Acknowledgments**

We are grateful for the assistance of JSC “PA ‘UOMP’” represented by Alexey A. Chupov Chief Designer of the Design Bureau of Medical Equipment. The article is a part of the work devoted to the implementation of the project “Creation of high-tech production of medical devices for the restoration of heart function to ensure public defibrillation”.

## Список литературы

1. Бочков А. В. О методах качественной оценки состояния безопасности структурно-сложных систем. *Надежность*. 2020;20(3):34–46. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46
2. Зеленцов Б. П. Использование показательного распределения в математических моделях надежности. *Надежность*. 2021;21(4):20–25. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-20-25
3. Аралов О. В., Буянов И. В. Анализ методов и подходов к оценке надежности при прогнозировании отказов оборудования магистрального трубопроводного транспорта. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2017;7(6):104–114.
4. Огороков М. В. Программно-математическая модель динамики интенсивности отказов технических систем длительного (периодического) использования с учетом дефектов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019663649, 21.10.2019. Заявка № 2019662498 от 09.10.2019.
5. Бурдышев И. В. Повышение надежности за счет перераспределения интенсивности отказов. *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*. 2020;1:488–493. Режим доступа: <https://innotech.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/01/Бурдышев.pdf>
6. Сухорученков Б. И., Огороков М. В. Определение показателей безотказности технических систем по интенсивности отказов подсистем. *Двойные технологии*. 2019;(3):3–9.
7. Мызникова Т. Н., Бажанова М. И., Белов М. В. Внедрение системы управленческого учета и контроллинга на промышленном предприятии. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2020;14(2):119–128. Режим доступа: <https://vestnik.susu.ru/em/article/view/9942>
8. Батьковский М. А., Кравчук П. В., Судаков В. А. Системы поддержки принятия решений в многокритериальных задачах управления инновационным развитием предприятий и интегрированных структур. *Актуальные вопросы современной экономики*. 2019;(4):140–146.
9. Дронь Е. А., Погорелов Г. И., Куликов Г. Г. Разработка функциональных моделей производства при внедрении автоматизированных информационных систем. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2018;18(3):68–80. Режим доступа: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/7799>
10. Анохов И. В. Уровни кодирования информации промышленного предприятия и предпосылки его взаимодействия с поставщиками и подрядчиками. *Вестник Пермского университета: экономика*. 2020;15(1):131–149. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-1-131-149
11. Титов В. В., Безмельницын Д. А., Напреева С. К. Планирование функционирования предприятия в условиях риска и неопределенности во внешней и внутренней среде. *Мир экономики и управления*. 2017;17(3):179–191. Режим доступа: <https://lib.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/13465>

12. Коновалова Г. И. Операционная модель оперативного управления цифровым производством на машиностроительном предприятии. *Организатор производства*. 2020;14(1):37–45. DOI: 10.25987/VSTU.2019.89.30.004
13. Сидорович Н. И. Совершенствование оперативно-календарного планирования на промышленных предприятиях. *Наука и инновации*. 2015;(8):23–26.
14. Батьковский М. А., Кравчук П. В., Трофимец Я. В. Развитие оперативного управления производственными процессами на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2019;15(2):328–342. DOI: 10.24891/ni.15.2.328
15. Васенев К. П. Построение системы интегрированного планирования на промышленном предприятии для турбулентных рыночных условий. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*. 2017;(4):118–141. DOI: 10.38050/01300105201746
16. Зубкова Н. В. Математическое моделирование оптимизации системы оперативного планирования на машиностроительных предприятиях. *Современные научные исследования и инновации*. 2016;(9). Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2016/09/72094>
17. Алексеев М. А., Фрейдина Е. В. Методологические основы развития теории робастного управления экономическими системами. *Вестник НГУЭУ*. 2017;(2):19–29. Режим доступа: <https://nsuem.elpub.ru/jour/article/view/1032>
18. Сидоренко Ю. А. Особенности и методология планирования на машиностроительном предприятии. *Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. Серия: Социальные науки*. 2015;(2):35–41. Режим доступа: [http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik\\_soc/18115942\\_2015\\_2\(38\)\\_unicode/0035-0041.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik_soc/18115942_2015_2(38)_unicode/0035-0041.pdf)
19. Евченко А. В. Реализация графических моделей информационных потоков и документооборота в системах сквозного производственного планирования и оперативного управления на предприятиях. *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2020;(2):95–104.
20. Короленко В. В., Грибанов В. В., Дорошенко А. Б., Логойда В. С. Оптимизация распределения заказов при оперативном планировании поставок материальных ресурсов для авиационной техники. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2018;(5):60–71.
21. Ченгарь О. В., Шевченко В. И., Мащенко Е. Н. Экспериментальное исследование адекватности модели организационного планирования загрузки технологического оборудования машиностроительного производства. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2019;(5):95–102.
22. Батьковский А. М., Судаков В. А., Хрусталева Е. Ю. Нейро-нечеткая модель управления инновационно активным предприятием. *Научный журнал КубГАУ*. 2019;(153):1–16. DOI: 10.21515/1990-4665-153-009
23. Сычев В. А. Методы производственного планирования в инновационных и наукоемких производствах в условиях перехода

к цифровой экономике. *Дружеровский вестник*. 2020;(6):19–28. DOI: 10.17213/2312-6469-2020-6-19-28

24. Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dorosinsky L. G. Quality Assurance Algorithms for the Isocenter, FOV, MLC Leakage, Dynamic MLC Banks Position and Leaf Position Measurements. In: *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 25–27 October 2019*. P. 0705–0709. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958219

25. Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dolganov A. Y., Lucian E., Bao X., Kazajkin V. N. OculusGraphy: Filtering of Electroretinography Response in Adults. In: *2021 IEEE 22<sup>nd</sup> International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souza, 30 June–4 July 2021*. P. 395–398. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507654

26. Zhdanov A. E., Evdochim L., Bao X., Dolganov A. Y., Borisov V. I., Kazajkin V. N., Ponomarev V. O., Lizunov A. V., Dorosinskiy L. G. Oculusgraphy: Ocular examination for toxicity evaluation based on biomedical signals. In: *2020 International Conference on e-Health and Bio-engineering (EHB), Iasi, 29–30 October 2020*. P. 1–6. DOI: 10.1109/EHB50910.2020.9280291

## References

1. Bochkov A. V. On the methods of qualitative estimation of the safety state of structurally complex systems. *Dependability*. 2020;20(3):34–46. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46

2. Zelentsov B. P. Use of exponential distribution in mathematical models of dependability. *Dependability*. 2021;21(4):20–25. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-20-25

3. Aralov O. V., Buyanov I. V. Analysis of methods and approaches to reliability assessment in the prediction of main pipeline transport equipment failures. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017;7(6):104–114. (In Russ.)

4. Okorokov M. V. *Software and mathematical model of dynamics of failure rate of technical systems of long-term (periodic) use taking into account defects*. Certificate of program registration for computers RU 2019663649, 21.10.2019. Application No. 2019662498 dated 09.10.2019.

5. Burdyshev I. V. Increasing reliability by reallocating the failure rates. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika*. 2020;1:488–493. (In Russ.) Available at: <https://innotech.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/01/Бурдышев.pdf>

6. Sukhoruchenkov B. I., Okorokov M. V. The definition of indicators of reliability of technical systems according to the failure rate of subsystems. *Dvoynye tekhnologii*. 2019;(3):3–9. (In Russ.)

7. Myznikova T. N., Bazhanova M. I., Belov M. V. Implementation of management accounting and controlling system at industrial enterprise. *Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*. 2020;14(2):119–128. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.susu.ru/em/article/view/9942>

8. Batkovsky M. A., Kravchuk P. V., Sudakov V. A. Tools for creating a diversification program events at innovative and active enterprises of the military-industrial complex. *Actual Issues of the Modern Economy*. 2019;(4):140–146. (In Russ.)
9. Dron E. A., Pogorelov G. I., Kulikov G. G. Development of production models at introduction of automated information systems. *Bulletin of South Ural State University. Series: Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(3):68–80. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/7799>
10. Anokhov I. V. Information coding levels in an industrial enterprise and prerequisites for its interaction with the suppliers and contractors. *Perm University Herald. Economy*. 2020;15(1):131–149. (In Russ.) DOI: 10.17072/1994-9960-2020-1-131-149
11. Titov V. V., Bezmelnitsyn D. A., Napreyeva S. K. Enterprise operation planning in the conditions of risk and uncertainty in the external and internal environment. *World of Economics and Management*. 2017;17(3):179–191. (In Russ.) Available at: <https://lib.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/13465>
12. Konovalova G. I. Operating model of operational digital management production at the machinebuilding enterprise. *Organizer of Production*. 2020;14(1):37–45. (In Russ.) DOI: 10.25987/VSTU.2019.89.30.004
13. Sidarovich N. I. The day-to-day planning at the industrial enterprises. *The Science and Innovations*. 2015;(8):23–26. (In Russ.)
14. Batkovsky A. M., Kravchuk P. V., Trofimets V. Ya. The development of operational management of production processes in the military-industrial complex. *National Interests: Priorities and Security*. 2019;15(2):328–342. DOI: 10.24891/ni.15.2.328
15. Vasenev K. P. Construction of integrated planning system for an industrial enterprise in a turbulent market environment. *Moscow University Economics Bulletin*. 2017;(4):118–141. (In Russ.) DOI: 10.38050/01300105201746
16. Zubkova N. V. Mathematical modelling of optimization of system of operational planning at engineering enterprises. *Modern scientific researches and innovations*. 2016;(9). (In Russ.) Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2016/09/72094>
17. Alekseev M. A., Freydina E. V. Methodological foundations development of the theory of robust governance of economic systems. *Vestnik NSUEM*. 2017;(2):19–39. (In Russ.) Available at: <https://nsuem.elpub.ru/jour/article/view/1032>
18. Sidorenko Yu. A. Some features and methodology of production planning at a machine-building company. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series: Social Sciences*. 2015;(2):35–41. (In Russ.) Available at: [http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik\\_soc/18115942\\_2015\\_-\\_2\(38\)\\_unicode/0035-0041.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik_soc/18115942_2015_-_2(38)_unicode/0035-0041.pdf)
19. Evchenko A. V. Implementation of graphical models of information flows and document flow in end-to-end production planning and operational management systems at enterprises.

*Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya.* 2020;(2):95–104. (In Russ.)

20. Korolenko V.V., Gribanov V.V., Doroshenko A.B., Logoyda V.S. Orders distribution optimization for operational planning of aviation engineering material resources deliveries. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika.* 2018;(5):60–71. (In Russ.)

21. Chengar O.V., Shevchenko V.I., Mashenko E.N. Experimental study of the adequacy of the model of organizational planning of loading technological equipment of machine-building production. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* 2019;(5):95–102. (In Russ.)

22. Batkovskiy A.M., Sudakov V.A., Khrustalev E. Yu. Neuro-fuzzy control model of an innovation-active company management. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University.* 2019;(153):1–16. (In Russ.) DOI: 10.21515/1990-4665-153-009

23. Sychev V.A. The use of business simulations in management the costs of the industrial enterprises. *Drukerovskij vestnik.* 2020;(6):19–28. (In Russ.) DOI: 10.17213/2312-6469-2020-6-19-28

24. Zhdanov A.E., Borisov V.I., Dorosinsky L.G. Quality Assurance Algorithms for the Isocenter, FOV, MLC Leakage, Dynamic MLC Banks Position and Leaf Position Measurements. In: *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 25–27 October 2019*, pp. 0705–0709. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958219

25. Zhdanov A.E., Borisov V.I., Dolganov A.Y., Lucian E., Bao X., Kazajkin V.N. OculusGraphy: Filtering of Electroretinography Response in Adults. In: *2021 IEEE 22<sup>nd</sup> International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souza, 30 June–4 July 2021*, pp. 395–398. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507654

26. Zhdanov A.E., Evdochim L., Bao X., Dolganov A.Y., Borisov V.I., Kazajkin V.N., Ponomarev V.O., Lizunov A.V., Dorosinskiy L.G. Oculusgraphy: Ocular examination for toxicity evaluation based on biomedical signals. In: *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB), Iasi, 29–30 October 2020*, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EHB50910.2020.9280291

## Информация об авторах

**Подоляк Ольга Олеговна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры Организации машиностроительного производства, Институт новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

**Овчинникова Валентина Андреевна**, заместитель проректора по проектному обучению и дополнительному профессиональному образованию, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

**Селяхов Степан Николаевич**, начальник производства гражданского приборостроения медицинских изделий АО «Производственное объе-

динение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Екатеринбург, Россия)

**Кормин Тимофей Григорьевич**, аспирант направления Информатика и вычислительная техника, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

**Корежатов Андрей Владимирович**, руководитель направления реанимационных и клиничко-диагностических медицинских изделий АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Екатеринбург, Россия)

### Information about the authors

**Olga O. Podoliak**, Candidate of Economy Sciences, Associate Professor of the Engineering Production Organizations chair, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Valentina A. Ovchinnikova**, deputy vice-rector for project training and additional professional education, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Stepan N. Selyahov**, head of the medical devices production at the JSC “Production Association “Urals Optical and Mechanical Plant” named after E.S. Yalamov (Ekaterinburg, Russia)

**Timofey G. Kormin**, postgraduate at the Computer Science, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Andrey V. Korejatov**, head of resuscitation and clinical diagnostic medical devices at the JSC “Production Association “Urals Optical and Mechanical Plant” named after E.S. Yalamov (Ekaterinburg, Russia)

Поступила / Received: 11.01.2022

Принята в печать / Accepted: 24.01.2022