

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91>

Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера

Е.Э. Аверченкова ¹✉, А.А. Шабанов ²

¹ Брянский государственный технический университет
ул. Горького, д.36, г. Брянск 241050, Российская Федерация

² ООО "Эрга"
ул. Хрустальная, д. 22, г. Калуга 248018, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать классификатор, модель, а также методику формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки для обеспечения эффективного функционирования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера.

Методы. Совокупность оборудования контроля и поверки в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера представлена в работе на основе теоретико-множественного подхода. Основой разработки классификатора оборудования контроля и поверки стал метод иерархической классификации. Формализация процесса принятия решения по формированию совокупности оборудования контроля и поверки основывается на методах теории принятия решений и методов математического анализа.

Результаты. Предложена теоретико-множественная модель совокупности оборудования контроля и поверки, а также соответствующий классификатор. Описана методика принятия решения по формированию оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки, позволяющая учитывать фактическую нагрузку на датчики измерения момента затяжки и оптимизировать затраты на закупку оборудования контроля и поверки. Применение разработанных моделей, классификаторов, методик и алгоритмов в условиях предприятия автомобилестроительного кластера показывает значительное снижение трудоемкости технологической подготовки производства, а также значительные показатели экономии финансовых затрат на закупку оборудования при формировании совокупности оборудования контроля и поверки.

Заключение. Разработанные классификатор, а также модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки позволяют упростить управленческую работу на предприятии автомобилестроительного кластера и решают задачу оптимального управления подсистемой контроля и поверки, входящей в организационно-технологическую систему обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера.

Ключевые слова: организационно-технологическое обеспечение производства; оборудование контроля и поверки; автомобилестроительный кластер

© Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А., 2022

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 73-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91>.

Поступила в редакцию 25.01.2022

Подписана в печать 14.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster

Elena E. Averchenkova ¹ ✉, Aleksei A. Shabanov ²

¹ Bryansk State Technical University
36, Gorkogo str., Bryansk 241050, Russian Federation

² Erga Ltd,
22, Krustalnaya str., Kaluga 248018, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Purpose of research. To develop a classifier of control and verification equipment, to propose a model of a set of control and verification equipment, as well as a methodology for forming an optimal set of control and verification equipment to ensure the effective functioning of an organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections of an automated assembly process control system at automotive cluster enterprises.

Methods. Calibration equipment set in the assembly production organizational and technological system based on thread joints of the automated assembly process control system at the enterprises of the automotive cluster is presented in the work on the basis of a set-theoretic approach. Set-theoretic models are used to describe the calibration equipment set. The method of hierarchical classification became the basis for the development of models. Formalization of the decision-making process on the formation of calibration equipment set is based on the methods of decision theory. Separate elements of the methodology are based on the use of methods of mathematical analysis.

Results. A set-theoretic model of the calibration equipment set is proposed. A classifier of calibration equipment is proposed. The technique of making a decision on the formation of calibration equipment set is described. The technique takes into account the actual load on the sensors for measuring the torque and allowing optimize the cost of calibration equipment purchasing. The cost savings from the use of the developed models, classifiers, methods and algorithms for production technological preparation and for equipment purchasing are calculated. The application of the developed models, classifiers, methods and algorithms in the conditions of an automotive cluster enterprise shows a significant reduction in the labor intensity of technological preparation of production, as well as significant savings in financial costs for the purchase of calibration equipment set.

Conclusion. The developed classifier, model and methodology for the formation of an optimal calibration equipment set make it possible to simplify managerial work at an automotive cluster enterprise and solve the problem of optimal control of calibration equipment subsystem, which is part of assembly production organizational and technological system based on thread joints of the automated assembly process control system at the enterprises of the automotive cluster.

Keywords: organizational and technological support of production; calibration equipment.

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Averchenkova E. E., Shabanov A. A. Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 73-91 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91).

Received 25.01.2022

Accepted 14.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

При конвейерном крупносерийном производстве существенно возрастает влияние на себестоимость продукции производственных потерь, вызванных неисправным оборудованием, что может приводить к нарушению технологических допусков, несвоевременному выявлению брака и возрастанию потерь на устранение последствий брака. От организации калибровки сборочного оборудования существенно зависят производственные потери, а соответствие фактического момента затяжки сборочного инструмента его значению по технологическому процессу является мерой качества сборочной системы. Момент затяжки является основной характеристикой элементов совокупности сборочного оборудования (ССО) и контролируется оборудованием контроля и поверки. Поэтому разработка классификатора оборудования контроля и поверки, модели совокупности оборудования контроля и поверки (СОКП), а также методики формирования оптимальной СОКП на предприятиях автомобилестроительного кластера является важной целью.

По вопросу поверки оборудования можно отметить работу Мишиной Т.А. и Барабановой И.А. [1]. По измерениям момента затяжки и используемому для этого оборудованию можно отметить работы отечественных ученых [2-5]. Вопросы, посвященные процессам и оборудованию сборки, рассматривались в иностранных публикациях [6-11]. Особенности анализа качества болтовых соединений рассмотрены в работах [12, 13]. Исследования процессов калибровок оборудования и описание индексов воспроизводимости процессов, используемых в качестве индикатора пригодности сборочного оборудования на основе резьбовых соединений, приведены в статьях [14-17]. Однако в современных исследованиях отсутствует классификатор, модель и методика оптимального формирования СОКП для предприятий автомобилестроительного кластера. В данной работе, как и в других работах авторов, применяется научный подход [18], позволяющий формализовать системы управления подсистемами организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера с позиции теории

управления. В данной статье авторами развиваются идеи, заложенные, в том числе в работах [19-22], и предлагается методика оптимального формирования совокупности оборудования контроля и поверки на предприятиях автомобильно-строительного кластера.

Материалы и методы

Современная крупная организационно-технологическая система обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера (СОМС АСУТП) обычно имеет в своем составе несколько тысяч различных сборочных инструментов, представляющих несколько десятков различных моделей инструментов. Состав оборудования подсистемы контроля и поверки (ПКП), являющейся частью СОМС АСУТП и предназначенной для калибровок элементов ССО и контроля затянутых резьбовых соединений, как правило, является сложным и разнородным.

Авторами был разработан классификатор СОКП, в ранних работах авторов [19-22] были проведены исследования, на основе которых были сформированы основные группы классификатора:

1 – Стационарные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

2 – Передвижные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

3 – Переносные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

4 – Моментные шкальные ключи.

Моментные шкальные ключи, как элемент оборудования контроля и поверки, в состав которого входят измерительные стрелочные, а также цифровые динамометрические ключи, можно выделить в особую подгруппу, т.к. они являются средством контроля – измерения фактического момента затяжки уже затянутого резьбового соединения, а не средством измерения момента затяжки, на который настраивается инструмент.

Разработанный классификатор в АСУТП предприятия служит для систематизации используемого оборудования контроля и поверки. Классификатор используется при поддержке принятия решений по формированию СОКП в АСУТП предприятия.

Важнейшим элементом всех измерительных стендов, входящих в оборудование контроля и поверки являются измерительные датчики для измерения момента затяжки. Датчики, устанавливаемые на измерительные стенды, имеют различные пределы для измерений момента затяжки. В данной работе предлагается оборудование контроля и поверки подразделить на 3 типа стендов: передвижные, переносные и стационарные. Каждый измерительный стенд должен рассматриваться в совокупности с комплектом необходимых для его работы измерительных датчиков. Таким образом, можно представить модель

стенда – элемента совокупности оборудования контроля и поверки следующим образом:

$$B_{\alpha} = \{S_{\gamma} | \gamma = 1 \dots 8\}, \quad (1)$$

где B_{α} – α -й стенд – элемент совокупности оборудования контроля и поверки; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; S_{γ} – γ -й датчик, как правило, на один стенд конструкция позволяет установить до 4, иногда до 8 датчиков, поэтому в реальных СОМС количество датчиков $\gamma = 1 \dots 8$.

Модель совокупности оборудования контроля и поверки тогда представим следующим образом:

$$CE = \{B_{\alpha} | \alpha = 1 \dots m\}, \quad (2)$$

где CE – Совокупность оборудования контроля и поверки; B_{α} – α -й стенд – элемент совокупности оборудования контроля и поверки; m – общее количество стендов – элементов совокупности оборудования контроля и поверки. Как правило, для обслуживания крупной совокупности сборочного оборудования насчитывающей несколько тысяч сборочных инструментов, расположенных на большой территории, используются передвижные и переносные стенды измерения момента затяжки. Однако нередко все оборудование контроля и поверки для не очень большой ССО, не превышающей 1000 единиц сборочных инструментов, состоит только из одного стенда. Это связано с высокой стоимостью оборудования контроля и поверки. На практике, количество различных

стендов используемых на одном даже крупном сборочном предприятии редко превышает 10 штук, таким образом, $m = 1 \dots 10$.

Все элементы СОКП являются сложными в эксплуатации и имеют высокую стоимость. Например, стоимость приобретения передвижного стенда, оснащенного датчиками для контроля момента затяжки, может достигать нескольких миллионов рублей. Помимо этого, все элементы СОКП являются средствами измерения и должны проходить периодическую поверку, стоимость которой для оборудования данной группы также высока (стоимость поверки передвижного стенда, оснащенного датчиками для контроля момента затяжки, может достигать нескольких сот тысяч рублей). Т.е. стоимость эксплуатации данной группы оборудования также высока. Таким образом, приобретение и эксплуатация элементов СОКП является весьма дорогостоящими, что приводит к необходимости оптимизации СОКП.

Для повышения эффективности принятого решения и выработки оптимального решения процесс принятия решений по формированию оптимальной СОКП предлагается структурировать. Разработанный авторами процесс принятия решения по формированию оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки состоит из следующих этапов:

1. Анализ СОКП локального предприятия автомобилестроительного кластера с учетом целевых ориентиров головного предприятия – СОКП должно обеспечивать измерение моментов за-

тяжки всех элементов совокупности сборочного оборудования.

2. Формирование критериев оптимальности:

- фактический калибровочный интервал момента затяжки j -го элемента совокупности сборочного оборудования до начала и в период его эксплуатации должен соответствовать моменту затяжки, на который данный инструмент был настроен в соответствии с технологическим процессом сборки изделия;

- стоимость оборудования контроля и поверки минимизирована;

- критерий согласования принятого решения – стоимость решения должна быть в установленных штаб-квартирой пределах.

3. Формирование альтернативных решений о формировании СОКП.

4. Выбор наилучшего решения о формировании СОКП с учетом критериев оптимального управления.

5. Принятие решения о формировании СОКП и его согласование с вышестоящим руководством – основой для согласования принятого решения руководством является критерий согласования принятого решения.

6. Реализация решения о формировании СОКП.

7. Оценка полученных результатов и корректировка при необходимости. Вся информация о вновь сформированной СОКП поступает в базу данных корпорации, где хранится, анализируется и полученный опыт используется для формирования новых и изменения суще-

ствующих СОКП на новых и существующих предприятиях автомобилестроительных кластеров в разных странах.

В табл. 1 представлены основные этапы методики формирования оптимальной СОКП на предприятии автомобилестроительного кластера.

Описание последовательности формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки представлено ниже:

1. Совокупность сборочного оборудования разделить на части в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов стандов. Рассмотрим модель совокупности сборочного оборудования в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов калибровочного оборудования:

$$AT = \{AT_1, AT_2, AT_3\}, \quad (3)$$

где AT – совокупность сборочного оборудования; AT_1 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на стационарных стандах измерения момента затяжки; AT_2 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на передвижных стандах измерения момента затяжки; AT_3 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на переносных стандах измерения момента затяжки. Одно или два из вышеуказанных подмножеств, могут быть пустыми, если применение тех или иных типов стандов в рассматриваемом случае нецелесообразно.

Таблица 1. Методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки**Table 1.** Methodology for creation of optimal calibration equipment set

Этап методики / Methodology stage	Содержание этапа / Stage content	Применяемые методы / Methods applied
1. Определение необходимых типов стендов и датчиков	1. Совокупность сборочного оборудования разделить на части в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов стендов 2. Определить типы стендов необходимые для калибровки совокупности сборочного оборудования 3. Подобрать модели датчиков таким образом, чтобы обеспечить настройку и калибровку всех элементов совокупности сборочного оборудования 4. Согласовать цену α -й модели стенда и γ -й модели стенда по критерию согласования принятого решения	Методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа
2. Определение рациональной периодичности проверок момента затяжки	1. Рассмотреть изменения момента затяжки за промежуток времени не менее 100 рабочих смен и определить на основании данной статистики скорость разрегулирования 2. Выбрать метод определения оптимальной периодичности проверок: - если скорость разрегулирования стремиться к нулю, то используется вероятностный подход; - если скорость разрегулирования отлична от нуля, то используется экстраполяционный подход 3. Определить оптимальную периодичность проверок способом, соответствующим величине скорости разрегулирования момента затяжки сборочного инструмента	
3. Расчет количества датчиков и стендов	1. Выполнить расчет нагрузки на датчики на основании соответствия целевым характеристикам совокупности оборудования контроля и поверки 2. Расчет количества датчиков и стендов выполняется исходя из допустимой нагрузки на датчик и допустимого количества датчиков, устанавливаемых на стенд	

2. Для выбора необходимых типов стендов нужно рассмотреть, возможно ли калибровать тот или иной сборочный инструмент на используемом стенде в данных условиях производства. По результатам анализа выбираются типы стендов. Как правило, на предприятии мелкоузловой сборки, насчитывающем несколько тысяч сборочных инструментов, расположенных на большой территории, используются передвижные и переносные стенды измерения момента затяжки. В случае крупноузловой сборки (количество сборочных инструментов обычно не превышает 1000 штук) обычно используется один стационарный или передвижной стенд.

3. Для каждой из трех частей совокупности сборочного оборудования AT_1, AT_2, AT_3 нужно определить совокупность моментов затяжки резьбовых соединений, выполняемых инструментами, входящими в данное подмножество. Значения моментов затяжки инструментов, входящих в данное подмножество инструментов представить в виде упорядоченных множеств:

$$Z_{\alpha} = \{z_{\alpha_1}, z_{\alpha_2}, \dots, z_{\alpha_j}, \dots, z_{\alpha_{r-1}}, z_{\alpha_r}\},$$

где r – количество моментов затяжки, выполняемых частью совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на α -х стендах измерения момента затяжки; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; z_{α_j} – числовые значения j -х моментов затяж-

ки сборочных инструментов калибруемых на α -х стендах измеренные в Н*м (Ньютон*метр).

Далее определить, какие датчики должны быть установлены на стенды. Датчики имеют различные пределы для измерений момента затяжки, каждый может обеспечить измерение множества моментов в некотором диапазоне. Подбор датчиков необходимо осуществить таким образом, чтобы обеспечить калибровку совокупности моментов затяжки Z_{α} , используемых в конкретном процессе механосборки:

$$Z_{\alpha} \in \{ZN_{\alpha_1_min} \dots ZN_{\alpha_\gamma_max}\},$$

где $ZN_{\alpha_1_min}$ – минимальный момент затяжки калибруемый первым датчиком устанавливаемым на α -й стенд; $ZN_{\alpha_\gamma_max}$ – максимальный момент затяжки калибруемый γ -м датчиком устанавливаемым на α -й стенд; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; γ – количество датчиков устанавливаемых на α -й стенд.

4. Стоимость одного измерительного датчика составляет несколько сотен тысяч рублей. Поэтому, для того чтобы избежать нерационального распределения ресурсов и добиться минимизации стоимости оборудования по критерию оптимального управления - минимизации стоимости ОКП, рекомендуется выбирать оборудование с минимальной приведенной стоимостью:

$$Ц_{\alpha} = \frac{ЦП_{\alpha}}{\Xi_{\alpha}},$$

где $ЦП_{\alpha}$ – закупочная цена α -й модели станда; Ξ_{α} – ресурс оборудования, выраженный в количестве затяжек за время эксплуатации;

$$Ц_{\alpha\gamma} = \frac{ЦП_{\alpha\gamma}}{\Xi_{\alpha\gamma}},$$

где $ЦП_{\alpha\gamma}$ – закупочная цена γ -й модели датчика, устанавливаемого на α -ю модель станда; $\Xi_{\alpha\gamma}$ – ресурс оборудования, выраженный в количестве затяжек за время эксплуатации.

Важным является учет величины ресурса затяжек не по данным, предоставляемым производителем оборудования, а по накопленной в различных филиалах корпорации статистике практического использования данного оборудования.

Согласовать цены α -х моделей стандов $ЦП_{\alpha}$ и γ -й моделей датчиков $ЦП_{\alpha\gamma}$, устанавливаемых на α -е модели стандов по критерию согласования принятого решения:

$$\begin{cases} ЦП_{\alpha} \in \{ЦП_{\alpha \min}; ЦП_{\alpha \max}\} \\ ЦП_{\alpha\gamma} \in \{ЦП_{\alpha\gamma \min}; ЦП_{\alpha\gamma \max}\}, \end{cases} \quad (4)$$

где $ЦП_{\alpha \min}$ – нижний установленный штаб-квартирой предел цены α -й модели станда, $ЦП_{\alpha \max}$ – верхний установленный штаб-квартирой предел цены α -й модели станда; $ЦП_{\alpha\gamma \min}$ – нижний установленный штаб-квартирой предел цены γ -й модели датчика, $ЦП_{\alpha\gamma \max}$ – верхний установленный штаб-квартирой предел цены γ -й модели датчика.

5. Определить нагрузку на датчики при первоначальной настройке элементов ССО. При запуске нового производства или нового проекта все инструменты должны быть настроены на требуемые моменты затяжки, поэтому нагрузку на каждый датчик станда при настройке большой партии сборочного инструмента, поступившего в систему можно выразить с помощью предложенной авторами формулы:

$$N_{\gamma H} = m \sum_{j=x}^y b_j, \quad (5)$$

где $N_{\gamma H}$ – нагрузка на γ -й датчик при первоначальной настройке совокупности сборочных инструментов на требуемые моменты, $N_{\gamma H}$ измеряется в количестве калибровок; m – число контрольных затяжек, выполняемых каждым инструментом при его настройке. На практике число m для всех элементов ССО как правило одинаково, и составляет не менее 30 затяжек; b_j – количество инструментов настроенных на j -й момент затяжки; x – порядковый номер элемента множества моментов затяжки, для которого момент затяжки z_x – минимальный момент затяжки, контролируемый на γ -м датчике; y – порядковый номер элемента множества моментов затяжки, для которого момент затяжки z_y – максимальный момент затяжки, контролируемый на γ -м датчике.

6. Далее определить нагрузку на датчик станда в процессе работы сборочного инструмента. Для этого опре-

делить оптимальную периодичность калибровок оборудования для обеспечения с одной стороны требуемого уровня качества продукции, с другой стороны минимума финансовых затрат. Вопрос выбора оптимальной периодичности калибровок сборочного оборудования рассматривался ранее автором в работе [21]. Нагрузка на γ -й датчик рассчитывается по разработанной авторами формуле

$$H_{\gamma}(t) = td \sum_{g=1}^f q_{\gamma g} \sum_{j=x}^y b_{jg}, \quad (6)$$

где $H_{\gamma}(t)$ – нагрузка на γ -й датчик за период времени t ; $g=1\dots f$ – индексы групп сборочных инструментов, отличающиеся друг от друга различной периодичностью калибровки; f – количество групп сборочных инструментов, отличающиеся друг от друга периодичностью калибровки; d – число затяжек, выполняемых инструментом из g -й группы, настроенным на j -й момент затяжки при калибровке в период его эксплуатации, на практике d обычно одинаково для всех элементов ССО, и составляет от 3 до 5 затяжек; $q_{\gamma g}$ – периодичность калибровок каждого инструмента из g -й группы, настроенного на моменты затяжки из множества моментов, контролируемых на γ -м датчике; t – период времени, для которого рассчитывается нагрузка на оборудование, измеряемый в количестве рабочих смен; b_{jg} – количество инструментов из g -й группы, настроенных на j -й момент затяжки.

На практике, на каждом стенде, как правило, используется не более 3...4 датчиков. Этого количества обычно бывает достаточно, чтобы покрыть весь диапазон моментов. Допустимую нагрузку, измеряемую в количестве рабочих циклов, обычно содержит паспорт датчика. Однако, на практике, если это возможно, лучше использовать производственную статистику из базы данных корпорации с других предприятий, где используется такое же оборудование, поскольку в сравнении с показателями, заявленными производителями она имеет большую достоверность.

7. Измерительные стенды и датчики должны выдерживать требуемую нагрузку, измеряемую в количестве затяжек. Расчетное количество датчиков γ -й модели должно соответствовать неравенству:

$$W_{\gamma} \geq \frac{H_{\gamma H} + H_{\gamma}(t)}{H_{\gamma D}}, \quad (7)$$

где W_{γ} – количество датчиков γ -й модели; $H_{\gamma D}$ – допустимая нагрузка датчика γ -й модели; $H_{\gamma H}$ – нагрузка на γ -й датчик, при первоначальной настройке совокупности сборочных инструментов на требуемые моменты затяжки; $H_{\gamma}(t)$ – нагрузка на γ -й датчик за период времени t .

Если количество датчиков γ -й модели больше одного, то один датчик устанавливается на стенд, а остальные помещаются в совокупность запасных сборочных инструментов, приборов и приспособлений (СЗИП), и использу-

ются в случае выхода из строя работающего датчика.

8. В случае если количество датчиков, подлежащих установке на стенд, превышает технологические возможности стенда, то оставшиеся датчики необходимо установить на другой стенд этого же типа. Таким образом, расчетное количество стендов α -й модели должно соответствовать неравенству:

$$V_{\alpha} \geq \frac{W_{\alpha\Phi}}{W_{\alpha Д}}, \quad (8)$$

где V_{α} – количество стендов α -й модели; $W_{\alpha Д}$ – допустимое количество датчиков, которое возможно установить на стенд α -й модели; $W_{\alpha\Phi}$ – фактическое количество датчиков, которое необходимо установить на стенд α -й модели.

Результаты и их обсуждение

Разработанная методика позволяет ЛПР сократить время на принятие организационного решения за счет использования готовой последовательности действий в конкретной производственной ситуации формирования оптимальной СОКП. Разработанная последовательность действий может быть представлена в виде алгоритма на рис.1.

Экономический эффект при затратах на технологическую подготовку производства рассчитываем по формуле:

$$\Delta Э_i = \Delta T_i * D_{и}, \quad (9)$$

где $\Delta Э_i$ – экономия затрат в рублях от применения i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных; ΔT_i – эконо-

мия затрат в часах от применения i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных; при расчете затрат на технологическую подготовку производства необходимо учесть часовую ставку занятого инженера-технолога (вместе с отчислениями). Примем, что средняя оплата в час работника составит $D_{и} = 500$ руб/час.

Экономия затрат в процентах рассчитана по формуле:

$$\Delta T_{\Pi i} = \frac{\Delta T_i}{T_B} * 100\%, \quad (10)$$

где $\Delta T_{\Pi i}$ – экономия затрат в процентах при использовании i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик и алгоритмов; T_B – общая трудоемкость в часах без применения разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных.

Расчет производился для СОМС АСУТП, содержащей 3350 единиц ССО. Общая трудоемкость технологической подготовки производства по формированию СОМС АСУТП без применения разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных составила $T_B = 960$ часов.

Применение каждого из разработанных пунктов позволило сократить трудоемкость на различное время. На основе формул (9) и (10) полученная экономия при применении каждого разработанного элемента управления посчитана в табл. 2.

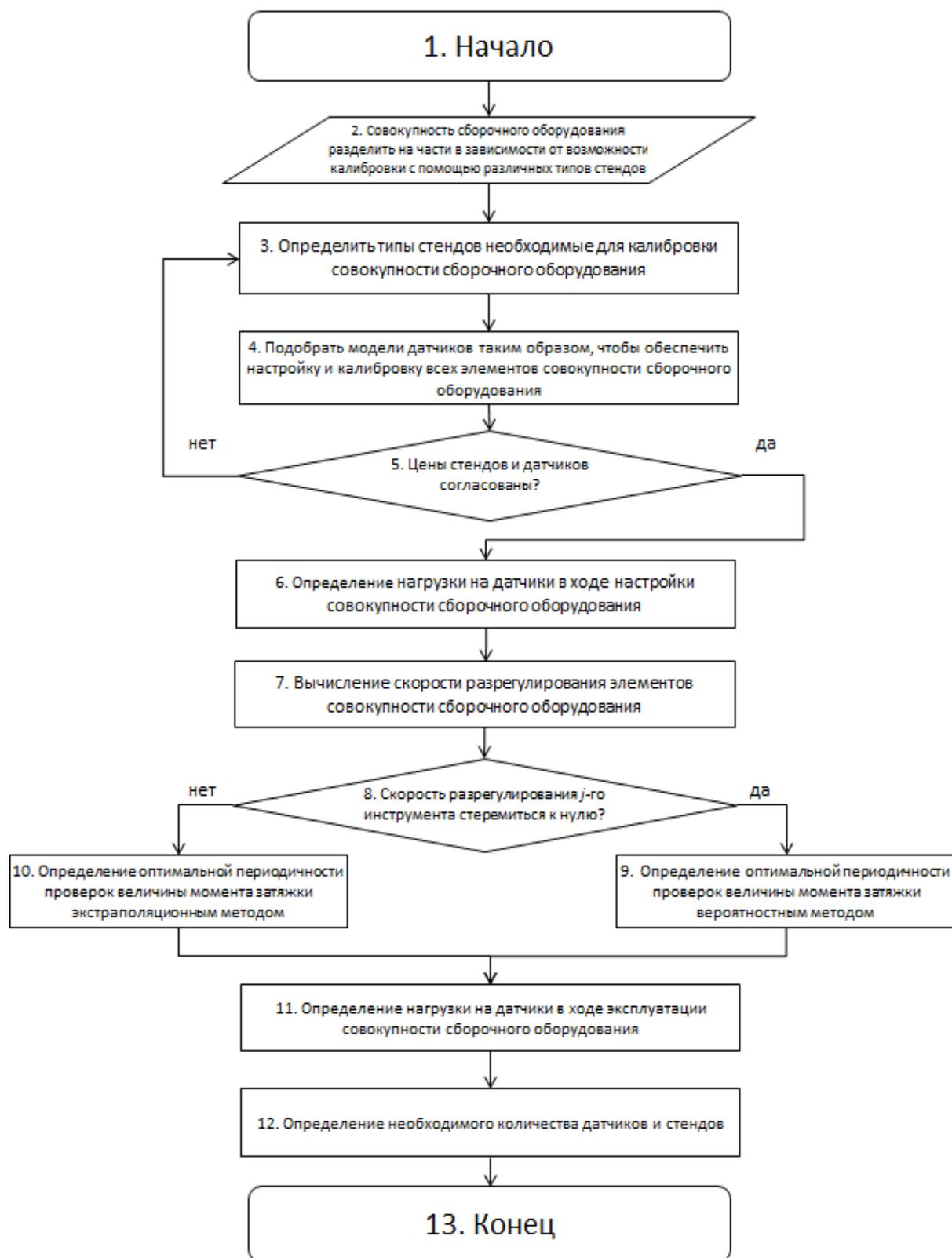


Рис. 1. Алгоритм формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки

Fig. 1. Algorithm for creation of optimal calibration equipment set

Таблица 2. Показатели трудоемкости технологической подготовки производства при формировании совокупности оборудования контроля и поверки**Table 2.** Labor intensity indicators of production technological preparation during calibration equipment set creation

Разработанный элемент управления СОМС АСУТП	Расчет	Эффективность, %	Сокращение трудоемкости от применения разработанных пунктов, часов	Экономический эффект, рублей
1. Классификатор сборочного оборудования системы обеспечения механической сборки в зависимости от удобства и возможности их калибровки	$\Delta T_1 = 16$ часов $\Delta T_{П1} = \frac{16}{960} * 100\% = 1,67\%$ $\Delta \mathcal{E}_1 = 16 * 500 = 8000$ (руб)	$\Delta T_{П1} = 1,67\%$	$\Delta T_1 = 16$ часов	$\Delta \mathcal{E}_1 = 8000$ (руб)
2. Модель совокупности оборудования контроля и поверки	$\Delta T_2 = 8$ часов $\Delta T_{П2} = \frac{8}{960} * 100\% = 0,83\%$ $\Delta \mathcal{E}_2 = 8 * 500 = 4000$ (руб)	$\Delta T_{П2} = 0,83\%$	$\Delta T_2 = 8$ часов	$\Delta \mathcal{E}_2 = 4000$ (руб)
3. Классификатор совокупности оборудования контроля и поверки	$\Delta T_3 = 8$ часов $\Delta T_{П3} = \frac{8}{960} * 100\% = 0,83\%$ $\Delta \mathcal{E}_3 = 8 * 500 = 4000$ (руб)	$\Delta T_{П3} = 0,83\%$	$\Delta T_3 = 8$ часов	$\Delta \mathcal{E}_3 = 4000$ (руб)
4. Методика и алгоритм формирования совокупности оборудования контроля и поверки на основе критериев оптимальности	$\Delta T_4 = 40$ часов $\Delta T_{П4} = \frac{40}{960} * 100\% = 4,17\%$ $\Delta \mathcal{E}_4 = 40 * 500 = 20000$ (руб)	$\Delta T_{П4} = 2,45\%$	$\Delta T_4 = 24$ часа	$\Delta \mathcal{E}_4 = 20000$ (руб)

Рассмотрим экономию финансовых затрат на закупку оборудования контроля и поверки. Экономический эффект определяется за счет снижения стоимости оборудования по формуле:

$$\Delta C_{\text{СОКП}} = C_{\text{Б_СОКП}} - C_{\text{СОКП}}, \quad (11)$$

где $\Delta C_{\text{СОКП}}$ – экономия затрат в рублях при использовании разработанных методики и алгоритма для формирования оптимальной СОКП, $C_{\text{Б_СОКП}}$ – стоимость закупки СОКП без использования разработанных методики и алгоритма, $C_{\text{СОКП}}$ – стоимость закупки СОКП при использовании разработанных методики и алгоритма.

$$C_{\text{Б_СОКП}} = 10\,400\,000 \text{ рублей};$$

$$C_{\text{СОКП}} = 6\,200\,000 \text{ рублей};$$

$$\Delta C_{\text{СОКП}} = 10\,400\,000 - 6\,200\,000 = 4\,200\,000 \text{ (руб)}$$

Экономия затрат в процентах рассчитана по формуле:

$$\Delta C_{\text{П_СОКП}} = \frac{\Delta C_{\text{СОКП}}}{C_{\text{Б_СОКП}}} * 100\%, \quad (12)$$

где $\Delta C_{\text{П_СОКП}}$ – экономия затрат в процентах при использовании разработанных методики и алгоритма.

$$\Delta C_{\text{П1}} = \frac{4\,200\,000}{10\,400\,000} * 100\% = 40,38\%.$$

Выводы

Задачей управления СОМС АСУТП является эффективное использование финансовых ресурсов на закупку оборудования для бесперебойного обеспечения производства, обеспечивающего успешный результат для головного офиса автомобильной корпорации, владеющей заводом автомобильного кластера. Разработанные авторами классификатор и модель совокупности оборудования контроля и поверки, а также методика формирования оптимальной СОКП позволяют решить эти задачи за счет наличия готовой последовательности действий по формированию оптимального состава оборудования. Разработки авторов можно использовать в технологических отделах крупных автомобилестроительных корпораций для планирования закупок оборудования контроля и поверки для существующих и вновь создаваемых предприятий автомобилестроительного кластера или предприятий других отраслей, имеющих аналогичную структуру СОМС АСУТП.

Список литературы

1. Мишина Т.А., Барабанова И.А. Применение методологии RFMEA-анализа для процесса поверки СИ // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 6 (21). С. 62-68.
2. Попов А.В., Чудинов В.А., Шаякбаров И.Э. Повышение качества контроля моментов затяжек резьбовых соединений методом отворачивания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 315-322.

3. Маломыжев О.Л., Скутельник В.В., Бектемиров А.С. Исследование момента затяжки ответственных резьбовых соединений на срок их службы на примере шатунных болтов двигателей легковых автомобилей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6 (113). С. 156-162.
4. Спиридонов О.В. Технологические расчеты при сборке резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 43-48.
5. Зеленский А.В., Терехина О.В. Устройства измерения крутящего момента в технологических процессах соединения резьбовых изделий // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2012. Т. 2. С. 44-45.
6. Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_32
7. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. Int J Adv Manuf Technol 2019, 101, 1481–1493. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3027-1>
8. Faccio M., Ferrari E., Gamberi M. et al. Human Factor Analyser for work measurement of manual manufacturing and assembly processes. Int J Adv Manuf Technol, 2019, 103, 861–877. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03570-z>
9. Cloud, G.L. William M. Murray Lecture: Some Curious Unresolved Problems, Speculations, and Advances in Mechanical Fastening. Exp Mech 53, 2012, 1073–1104 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9736-3>
10. Poparad H. Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering. CONAT 2016. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65
11. Doshi J.A., Desai D. Overview of Automotive Core Tools: Applications and Benefits. J. Inst. Eng. India Ser. C 98, 515–526. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0288-z>
12. Tesfay Y.Y. Process Capability Analysis. In: Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs. Springer, Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68402-0_6
13. Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. In-service Preload Monitoring of Bolted Joints Subjected to Fatigue Loading Using a Novel ‘MoniTorque’ Bolt. In: Beese A., Zehnder A., Xia S. (eds) Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21611-9_32

14. Xu W., Cheng Q., Yang C. et al. Dynamic analysis and looseness evaluation of bolted connection under vibration of machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07615-0>

15. Jeang A., Chung C.P. Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. *Int J Adv Manuf Technol* 43, 710–719. 2009. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1741-9>

16. Khodaygan S., Movahhedy M.R. Functional process capability analysis in mechanical systems. *Int J Adv Manuf Technol* 73, 899–912. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5800-0>

17. Yang Y. 2019. Application Research of Process Capability Analysis in Manufacturing Quality Control. In: Deng K., Yu Z., Patnaik S., Wang J. (eds) *Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 856. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00214-5_53

18. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд. М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с. ISBN 978-5-94052-222-5.

19. Шабанов А.А. Решение задачи оптимизации частоты проверок параметров оборудования // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. Вып. 10. М.: АО «ЦНИИ Электроника», 2015. С. 105-114.

20. Шабанов А.А. Разработка методики рационального выбора структуры и состава запаса сборочных инструментов и приспособлений для системы обеспечения механической сборки // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. Вып. 10. М.: АО «ЦНИИ Электроника», 2015. С. 115-124.

21. Шабанов А.А., Шабанов А.К. Анализ структуры подсистемы контроля и проверки современной системы обеспечения механосборки // *Труды XXXIII Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем» / Филиал военной академии РВСН им. Петра Великого*. Серпухов, 2014. Сб. 4. С. 301–305.

22. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э. Моделирование систем управления организационно-технологическим обеспечением механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2021. №3(13), 4(14), С.58-68.

References

1. Mishina T.A., Varabanova I.A. *Primenenie metodologii PFMEA-analiza dlya processa poverki SI [Application of the PFMEA-analysis methodology for the process of verification of measuring instruments]. Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2018, no. 6 (21), pp 62-68.

2. Popov A.V., Chudinov V.A., Shayakbarov I.E. Povyshenie kachestva kontrolya momentov zatyazhek rez'bovyyh soedinenij metodom otvorachivaniya [Improving the quality of threaded joints checking by unscrewing] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Tula State University. Technical sciences*, 2018, no. 2, pp. 315-322.

3. Malomyzhev O.L., Skutel'nik V.V., Bektemirov A.S. Issledovanie momenta zatyazhki otvetstvennykh rez'bovyyh soedinenij na srok ih sluzhby na primere shatunnykh boltov dvigatelej legkovyyh avtomobilej [Study of the torque of critical threaded joints for their service life by the example of connecting rod bolts of car engines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 6 (113), pp 156-162.

4. Spiridonov O.V. Tekhnologicheskie raschety pri sborke rez'bovyyh soedinenij Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Technological calculations for the assembly of threaded joints] *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in Mechanical Engineering, Instrumentation*, 2015, no. 6, pp 43-48.

5. Zelenskij A.V., Terekhina O.V. Ustrojstva izmereniya krutyashchego momenta v tekhnologicheskikh processah soedineniya rez'bovyyh izdelij [Devices for torque measuring in technological processes of connecting threaded products] *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2012, vol. 2, pp. 44-45.

6. Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. (2019) Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_32

7. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. *Int J Adv Manuf Technol* 101, 1481–1493 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3027-1>

8. Faccio M., Ferrari E., Gamberi M. et al. Human Factor Analyser for work measurement of manual manufacturing and assembly processes. *Int J Adv Manuf Technol* 103, 861–877 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03570-z>

9. Cloud G.L. 2012 William M. Murray Lecture: Some Curious Unresolved Problems, Speculations, and Advances in Mechanical Fastening. *Exp Mech* 53, 1073–1104 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9736-3>

10. Poparad H. (2017) Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering. CONAT 2016*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65

11. Doshi J.A., Desai D. Overview of Automotive Core Tools: Applications and Benefits. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 98, 515–526 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0288-z>

12. Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. (2016) In-service Preload Monitoring of Bolted Joints Subjected to Fatigue Loading Using a Novel ‘MoniTorque’ Bolt. In: Beese A., Zehnder A., Xia S. (eds) *Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution*, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21611-9_32

13. Xu W., Cheng Q., Yang C. et al. Dynamic analysis and looseness evaluation of bolted connection under vibration of machine tools. *Int J Adv Manuf Technol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07615-0>

14. Tesfay Y.Y. (2021) Process Capability Analysis. In: *Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68402-0_6

15. Jeang A., Chung C.P. Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. *Int J Adv Manuf Technol* 43, 710–719 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1741-9>

16. Khodaygan S., Movahhedy M.R. Functional process capability analysis in mechanical systems. *Int J Adv Manuf Technol* 73, 899–912 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5800-0>

17. Yang Y. (2019) Application Research of Process Capability Analysis in Manufacturing Quality Control. In: Deng K., Yu Z., Patnaik S., Wang J. (eds) *Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 856. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00214-5_53

18. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of management of organizational systems]. Moscow, 2012. 604 p. ISBN 978-5-94052-222-5.

19. Shabanov A. A. *Reshenie zadachi optimizatsii chastoty proverok parametrov oborudovaniya* [Solution of the optimization problem of equipment parameters inspection frequency] *Voprosy radioelektroniki / Seriya obshchetekhnicheskaya (OT) Vypusk 10*. [Questions of radio electronics. General technical series. Is. 10]. Moscow, 2015, pp. 105-114

20. Shabanov A. A. *Razrabotka metodiki racional'nogo vybora struktury i sostava zapasa sborochnykh instrumentov i prisposoblenij dlya sistemy obespecheniya mekhanicheskoy sborki* [Development of rational choice method of structure and composition of spare assembly tools and accessories for mechanical assembly system] *Voprosy radioelektroniki / Seriya obshchetekhnicheskaya (OT). Vyp. 10* [Questions of radio electronics. General technical series. Is. 10]. Moscow, 2015, pp. 115-124.

21. Shabanov A. A., Shabanov A. K. [Analysis of the structure of calibration equipment subsystem of a modern mechanical assembly support system] *Trudy XXXIII Vserossiyskoy NTK «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniya slozhnykh*

tekhnicheskikh i informatsionnykh sistem» [Proceedings of the XXXIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of the efficiency and safety of the functioning of complex technical and information systems"]. *Serpukhov, 2014, vol. 4*, pp 301-305 (in Russ.).

22. SHabanov A.A., AVerchenkova E.E. Modelirovanie sistem upravleniya organizacionno-tekhnologicheskim obespecheniem mekhanicheskoy sborki na predpriyatiyah avtomobilestroitel'nogo klastera [Modeling of management systems for organizational and technological support of mechanical assembly at enterprises of the automotive cluster]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*, 2021, №3(13), 4(14), pp.58-68.

Информация об авторах / Information about the Authors

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая экономика», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Elena E. AVerchenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Digital Economy Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Шабанов Алексей Александрович, ООО "Эрга", г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: aashabanov86@mail.ru

Aleksei A. Shabanov, Erga Ltd, Kaluga, Russian Federation, e-mail: aashabanov86@mail.ru