

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.02

doi:10.30987/2658-6436-2022-1-43-55

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СОВОКУПНОСТЬЮ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СБОРКИ

Алексей Александрович Шабанов^{1✉}, Елена Эдуардовна Аверченкова²,
Владимир Иванович Аверченков³

¹ «НПО ЭРГА», г. Калуга, Россия

^{2,3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹ aashabanov86@mail.ru

² lena_ki@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

³ aver@tu-brynsk.ru

Аннотация. Цель исследования: оптимизация управления совокупностью сборочного оборудования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятии автомобилестроительного кластера. Задача, решению которой посвящена статья: рассматривается совокупность сборочного оборудования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятии автомобилестроительного кластера. Разрабатываются модели, классификаторы и алгоритм для оптимального управления данной совокупностью. Методы исследования: методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа. Новизна работы: разработаны классификаторы сборочного оборудования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений в зависимости от конструкции и степени автоматизации оборудования и в зависимости от возможности калибровки оборудования. Основной отличительной характеристикой предложенного алгоритма стало использование приведенной стоимости сборочной операции, позволяющей формировать оптимальную совокупность сборочного оборудования. Результаты исследования: предложена теоретико-множественная модель элемента и совокупности сборочного оборудования. Разработаны классификаторы составляющих совокупности сборочного оборудования элементов. Разработан алгоритм формирования оптимальной совокупности сборочного оборудования на предприятии автомобилестроительного кластера. Разработанный алгоритм применяется при формировании совокупности сборочного оборудования на предприятиях автомобилестроительного кластера и на предприятиях с похожей организационно-технологической системой обеспечения механической сборки. Выводы: предложенная теоретико-множественная модель элемента совокупности сборочного оборудования позволяет накапливать и сохранять информацию об элементах совокупности сборочного оборудования необходимую для эффективного управления сборочным производством на предприятии автомобилестроительного кластера. Разработанные классификаторы применяются для декомпозиции совокупности оборудования используемой в сборке на основе резьбовых соединений и необходимы для решения задач автоматизированного управления организационно-технологической системой обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятии автомобилестроительного кластера.

Ключевые слова: сборочное оборудование, математическая модель, управляющий алгоритм, автомобилестроительный кластер

Для цитирования: Шабанов А. А., Аверченкова Е. Э., Аверченков В. И., Модель и алгоритм управления совокупностью сборочного оборудования системы обеспечения механической сборки // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 43-55. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-43-55.

Original article

Open Access Article

MODEL AND ALGORITHM FOR CONTROLLING THE ASSEMBLY EQUIPMENT OF MECHANICAL ASSEMBLY SUPPLY SYSTEM

Alexey A. Shabanov^{1✉}, Elena E. Averchenkova², Vladimir I. Averchenkov³

¹ Research and Production Company «ERGA», Kaluga

^{2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ aashabanov86@mail.ru

² lena_ki@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

³ aver@tu-brynsk.ru

Abstract. *The aim of the study is to optimize the control of the assembly equipment of the organizational and technological system for ensuring mechanical assembly based on threaded connections of the automated assembly process control system at an automotive cluster enterprise. The article solves the problem of considering the assembly equipment of an organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections of an automated control system for the technological assembly process at an automotive cluster enterprise. Models, classifiers and an algorithm for optimal control of this set are being developed. Research methods of control theory; of the set-theoretical approach; decision-making methods; methods of mathematical analysis are used in the article. The novelty of the work is to develop the classifiers of assembly equipment of the organizational and technological system for ensuring mechanical assembly based on threaded connections depending on the design and degree of the facility automation and the possibility of its calibration. The main distinguishing characteristic of the proposed algorithm is to use the reduced cost of the assembly operation, which makes it possible to form an optimal set of the assembly equipment. As a result of the research a set-theoretic model of an element and a set of assembly equipment are proposed. The classifiers of the elements that make up the assembly equipment are developed. An algorithm for forming an optimal set of assembly equipment at an automotive cluster enterprise is introduced. The developed algorithm is used in forming the assembly equipment at an automotive cluster enterprises and at the enterprises with a similar organizational and technological system for providing mechanical assembly. The findings of the research state that the proposed set-theoretic model of an assembly facility element allows accumulating and saving information about the elements of assembly equipment which is necessary for the effective management of assembly production at an automotive cluster enterprise. The developed classifiers are applied to decompose the set of equipment used in the assembly based on threaded connections and are necessary for solving the problems of automated control of the organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections of the automated control system for the assembly process at the automotive cluster enterprise.*

Keywords: assembly equipment, mathematical model, control algorithm, automotive cluster

For citation: Shabanov A. A., Averchenkova E. E., Averchenkov V. I. Model and algorithm for controlling the assembly equipment of mechanical assembly supply system. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 43-55. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-43-55.

Введение

Для современного механосборочного производства характерен высокий уровень автоматизации производственных процессов, поэтому технологическое оборудование должно обеспечивать не только автоматизацию обработки и сборки, но и стыковаться с оборудованием и техническими средствами, объединяющими отдельные виды технологического оборудования в единый автоматизированный производственный процесс [1]. Согласно работам [2, 3] Схиртладзе А.Г., Смоленцева В.П., Вороненко В.П. и др., для настоящего этапа развития машиностроения характерно: расширение функций и задач управления, усложнение объектов и законов управления, переход от управления отдельными объектами к управлению технологическими процессами, т.е. переход к сложным многоцелевым системам управления. Однако в современных исследованиях отсутствуют модели, классификаторы и алгоритмы оптимального формирования совокупностью сборочного оборудования (ССО) на предприятии автомобилестроительного кластера. Таким образом, разработка данных элементов организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятии автомобилестроительного кластера (СОМС АСУТП) оценивается как актуальное научно-практическое исследование. В данной статье развиваются идеи, заложенные в ранних работах автора [4, 5], и предлагается модель и классификаторы ССО СОМС АСУТП, а также алгоритм формирования оптимальной ССО.

Использование резьбовых соединений позволяет обеспечивать высокую надёжность и качество разъемных соединений при сравнительно невысокой стоимости [6]. С целью учета

специфики исследуемой предметной области, для разработки алгоритмов оптимальной организации и автоматизированного управления СОМС АСУТП на основе упомянутой выше научной базы, необходимо провести систематизацию и классификацию используемых сборочных инструментов.

Автомобилестроительное производство характеризуется частой сменой модельного ряда или же рестайлингом выпускаемых моделей автомобилей. Каждое подобное изменение является отдельным проектом, для которого можно либо закупить новое оборудование, либо использовать существующее. Разработанный алгоритм может применяться при управлении проектами в области запуска производственных сборочных линий и рестайлинга выпускаемых моделей в автомобилестроении. Также принципы разработанного алгоритма могут быть применены и на других производствах, характеризующихся большим количеством применяемых единиц сборочного оборудования (например, производство электроники).

Материалы, модели, эксперименты и методы

Рассмотрим разработанную модель описания элемента ССО являющейся частью подсистемы сборочного оборудования (ПСО) СОМС АСУТП. Подсистема сборочного оборудования непосредственно обеспечивает выполнение сборочного процесса. Подсистема сборочного оборудования состоит из ССО, использующегося в производстве, и средств автоматизации управления, планирования и учета оборудования (САУ). Совокупностью сборочного оборудования можно описать как:

$$AT = \{AT_k | k = 1 \dots n\} \quad (1)$$

где AT_k – k -й элемент ССО; n – общее количество сборочных инструментов, используемых в данной совокупности сборочного оборудования, $n \in N$. Основными элементами ССО являются сборочные инструменты, которыми выполняется затяжка сборочных резьбовых соединений. Элемент ССО опишем следующей моделью:

$$AT_k = \{a_k, b_k, c_k^{rp}, d_k^s, e^k, f_k, g_k^w, h_k^x, i_k, j_k^v\} \quad (2)$$

где AT_k – k -й сборочный инструмент – элемент совокупности сборочного оборудования; $k = 1 \dots n$, n – общее количество сборочных инструментов используемых в данной совокупности сборочного оборудования, $n \in N$; a_k – артикул k -го сборочного инструмента, $a = 1 \dots l$, l – общее количество артикулов сборочных инструментов, используемых в совокупности сборочного оборудования, $l \in N$; b_k – серийный номер k -го сборочного инструмента, серийный номер присваивается производителем оборудования, обозначение серийного номера у каждого производителя свое; c_k^{rm} – местоположение k -го сборочного инструмента в цехе, характеризуется r -м участком и m -м рабочим постом, где используется инструмент, $r \in R$, $m \in M$, R – совокупность участков использования сборочных инструментов, M – совокупность рабочих постов использования сборочных инструментов; d_k^s – выполняемые k -м сборочным инструментом операции технологического процесса, характеризуются s -м кодом или названием технологических процессов; $s \in S$; $e^k = \{e^{1k}, e^{2k}\}$ – числовые показатели, оценивающие пригодность k -го сборочного инструмента к использованию, где, $e^{1k} = C_p$, $e^{2k} = C_{pk}$, где, $C_p \in Q$ и $C_{pk} \in Q$ – индексы воспроизводимости процесса; f_k – числовое значение момента затяжки k -го сборочного инструмента полученное в результате калибровки; $f_k \in Q$; g_k^w – история w -ого использования k -го инструмента, которая содержит информацию о дате и времени поступления и изъятия с m -ого рабочего поста в цехе, $w = \{t_{\text{поступ}}, t_{\text{изъят}}, m\}$, параметр t задается в формате ДД.ММ.ГГ, $t \in N$; h_k – история поломок k -го инструмента – содержит информацию о дате и времени каждой поломки инструмента и характере поломки; параметр h задается в формате ДД.ММ.ГГ, $h \in N$; i_k – количество затяжек сборочных соединений, выполненное k -м инструментом – показывает степень износа инструмента, $i \in N$; i_k – степень износа k -го инструмента, описывается переменной $ЛП_k(t) = \langle A_k, E_k, W_k, O_k, V_k, y \rangle$,

где A_k – нумерация k -го сборочного инструмента; E_k – множество значений $ЛП_k(t)$, представляющее термы: $E_k = \{\text{«слабый износ»}, \text{«средний износ»}, \text{«сильный износ»}\}$; W_k – область определения износа k -го сборочного инструмента, задаваемая интервалами: «слабый износ» = $[0 \dots 10\,000]$ затяжек, «средний износ» = $[10\,001 \dots 100\,000]$ затяжек, «сильный износ» = $[100\,001 \dots +\infty]$ затяжек; O_k – синтаксическое правило; V_k – семантическое правило задания нечетких подмножеств множества W_k , y – порядковый номер затяжки, $y \in N$; j_k^z – z -ные технологические приспособления, используемые с k -м инструментом, $z \in \{G_o, U_p, K_j\}$, где G_o – o -й артикул адаптера, U_p – p -й артикул бит или головок для сборочных инструментов, K_j – j -й артикул технологической оснастки, без которой использование k -го сборочного инструмента невозможно. Данная модель элемента ССО позволяет накапливать и сохранять информацию об элементах ССО необходимую для эффективного управления сборочным производством.

Разработанные классификаторы элементов, входящих в ССО, необходимы для решения задач автоматизированного управления ПСО. В крупных СОМС АСУТП предприятий автомобилестроительных кластеров, используется большое количество различного сборочного оборудования, общее число которого достигает нескольких тысяч штук. В составе ССО можно выделить следующие группы сборочного оборудования:

- 1) динамометрические ключи;
- 2) непрограммируемые шуруповерты и гайковерты;
- 3) многоскоростные программируемые шуруповерты и гайковерты;
- 4) технологические приспособления.

Оборудованию разных групп свойственны различные типы отказов, по-разному распределенные во времени и по-разному влияющие на момент затяжки, соответствие которого его рассчитанному значению определяет качество сборочных работ и качество изделия. Каждая из трех первых групп оборудования отвечает за выполнение определенной части сборочного процесса. Таким образом, предлагаемая классификация оборудования позволяет разбить используемое сборочное оборудование на группы по типам, степени автоматизации затяжки и важности выполняемых резьбовых соединений.

Оборудование каждой из трех первых групп предназначено для выполнения определенных операций технологического процесса, обладающих различными параметрами. Так, программируемые шуруповерты и гайковерты обычно применяются для выполнения наиболее ответственных резьбовых соединений, оказывающих большое влияние на такие важные свойства изделия как безопасность эксплуатации и надежность. Непрограммируемые шуруповерты и гайковерты используются для выполнения менее ответственных соединений, не оказывающих большого влияния на безопасность эксплуатации и надежность изделия. Динамометрические ключи являются основным средством контроля затяжки соединения в СОМС АСУТП, не использующих программируемые инструменты. Данными инструментами затягиваются и проверяются ответственные сборочные соединения. К технологическим приспособлениям относятся различные головки, биты, адаптеры для сборочных инструментов и т.п., а также технологическая оснастка, без которой использование сборочных инструментов невозможно. Технологические приспособления используются почти на всех сборочных инструментах и, по сути, являются их частью при использовании сборочных инструментов в процессе сборки изделия.

Рассмотрим далее более подробно особенности оборудования, применяемого для сборки на основе резьбовых соединений. Сборочные инструменты для затяжки резьбовых соединений, применяемые на современных сборочных предприятиях разделены на 3 группы, в зависимости от степени автоматизации процесса затяжки и конструкции инструмента:

- 1 – динамометрические ключи;
- 2 – непрограммируемые шуруповерты и гайковерты;
- 3 – многоскоростные программируемые шуруповерты и гайковерты.

Рассмотрим динамометрические ключи. Динамометрические ключи – это гаечные ключи со встроенным динамометром. Динамометрические ключи разобьем на 4 подгруппы:

- А – предельного типа используемые с адаптером;
- В – предельного типа со встроенным адаптером;
- С – с регулируемой шкалой;
- Д – измерительные.

Например, динамометрический ключ предельного типа со встроенным адаптером в разработанной классификации будет иметь обозначение 1_B . В данном обозначении 1 – группа динамометрические ключи, В – предельного типа со встроенным адаптером.

Динамометрические ключи в данном случае разделены на подгруппы с точки зрения их функционального использования. В конвейерном производстве в основном используются динамометрические ключи предельного типа. В основном используются динамометрические ключи с адаптером – подгруппа А. Ключи со встроенным адаптером (подгруппа В) используются для затяжки труднодоступных соединений. На многих предприятиях динамометрические ключи являются основным средством окончательной затяжки резьбового соединения, и данными инструментами проверяются все соединения.

При сборке, как правило, применяются динамометрические ключи без шкалы момента (подгруппы А и В), не позволяющие регулировать момент затяжки без специальных приспособлений. Эти инструменты являются наиболее надежными, по сравнению с другими инструментами для затяжки резьбовых соединений, и позволяют избежать риска перетяжки сборочного соединения. Поэтому данный тип инструментов используется для затяжки ответственных узлов изделия.

Также применяются динамометрические ключи предельного типа со шкалой регулирования момента. Как правило, они применяются на участках коррекции изделий, для которых было выявлено ненадлежащее качество выполнения сборочных соединений. Применение динамометрических ключей с регулируемой шкалой (подгруппа С) позволяет использовать один инструмент для выполнения нескольких сборочных операций с различными моментами затяжки. Использование данного инструмента низкоквалифицированными рабочими нежелательно, т.к. может привести к изменению момента затяжки динамометрического ключа и как следствие выпуску продукции ненадлежащего качества.

Измерительные (подгруппа Д) стрелочные и цифровые динамометрические ключи в крупных СОМС АСУТП обычно применяются в качестве средств измерений для контроля качества уже затянутых соединений. Данные изделия обычно являются частью системы, обеспечивающей настройку и последующую калибровку ССО, а также проверку момента затяжки на уже затянутых соединениях. Применение данного типа динамометрического ключа в массовом производстве для затяжки соединений нежелательно, т.к. в инструментах данного типа не предусмотрена остановка инструмента после достижения требуемого момента, поэтому при его использовании низкоквалифицированным работником есть риск перетяжки сборочного соединения.

Непрограммируемые шуруповерты и гайковерты разобьем на подгруппы по следующим признакам:

- 1 – конфигурация;
- 2 – тип привода.

Классификатор непрограммируемых шуруповертов и гайковертов приведен в табл. 1. Например, аккумуляторный непрограммируемый угловой гайковерт в разработанной классификации будет иметь обозначение $2_{1B_3}^{2A}$, в данном обозначении 2 – группа непрограммируемые шуруповерты и гайковерты, $1B_3$ – угловой гайковерт, $2A$ – аккумуляторный.

Шуруповерты и гайковерты – это инструменты с регулируемым крутящим моментом предназначенные для завинчивания и отвинчивания болтов гаек и шурупов. Деление инструментов на шуруповерты и гайковерты достаточно условно. Обычно шуруповертами называются те инструменты, которые используются для винтов небольшого диаметра (не более М5 – М6), где требуется достаточно небольшое усилие затяжки, позволяющие

оператору удерживать инструмент одной рукой. Таким образом, под это определение подпадают инструменты с прямой (подгруппа 1A_1) или пистолетной (подгруппа 1A_2) рукоятью. На практике это ограничивает диапазон момента затяжки от 4 до 12 Нм, в зависимости от типа инструмента, тип соединения и рабочего положения.

Таблица 1

Классификатор непрограммируемых шуруповертов и гайковертов применяемых в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений на предприятиях автомобилестроительного кластера

Table 1

Classifier of non-programmable screws and wrenches used in organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections at automotive cluster enterprises

	Код		Код	
1 – Конфигурация	A	шуруповерты	A_1	с пистолетной рукоятью
			A_2	с прямой рукоятью
	B	гайковерты	B_1	с пистолетной рукоятью
			B_2	прямые гайковерты
			B_3	угловые гайковерты
2 – Тип привода	A	аккумуляторные		
	B	пневматические точные		
	C	пневматические ударные (импульсные)		

Для затяжки с моментом выше указанного диапазона сила реакции слишком высока для удерживания инструмента одной рукой с использованием простой прямой или пистолетной рукоятки, в этих случаях используются инструменты, называемые гайковертами. Принципиальным отличием от шуруповерта является невозможность, в силу большого момента затяжки, удерживать инструмент одной рукой без реакционных упоров различных типов. В частности, для инструментов, работающих в диапазоне от М6 и М14, момент затяжки которых 10...150 Нм, используются угловые гайковерты (подгруппа 1B), где сам инструмент предназначен для работы в качестве рычага для того, чтобы оператор мог преодолеть силы реакции. Гайковерты с пистолетной рукоятью (подгруппа 1B_1), прямые гайковерты (подгруппа 1B_2) и угловые гайковерты (подгруппа 1B_3) работающие на момент затяжки больше 150 Нм должны оснащаться специальными упорами, выполняющими роль рычага для поглощения силы реакции.

Важным отличием промышленных шуруповертов от их профессиональных аналогов является невозможность регулировки и настройки момента затяжки вручную без специальных приспособлений. Это делает невозможным изменение момента неквалифицированным персоналом, не обученным настройке данного оборудования, и таким образом позволяет избежать возможности появления дефектов при сборке изделий.

Непрограммируемые шуруповерты и гайковерты, применяемые в массовом сборочном производстве, разделяются, в зависимости от типа привода, на инструменты с аккумуляторным и пневматическим приводом. Наиболее простым типом инструмента являются аккумуляторные (подгруппа 2A) шуруповерты и гайковерты, они отличаются от своих аналогов, не принадлежащих к классу промышленных инструментов, более высокой степенью надежности и более высокой работоспособностью. Такие инструмент должны быть способны работать 24 часа в сутки, 7 дней в неделю. В некоторых случаях инструменты данного типа также имеют специальные внешние отличия от инструментов того же производителя, но не относимых к промышленному классу. Поэтому инструменты, относящиеся к разным классам, могут быть окрашены в разные цвета.

Так же широкое применение получили инструменты с пневматическим приводом. Сложность использования инструментов данного типа заключается в том, что для них необходимы системы подачи сжатого воздуха с установленными маслораспылителями и

фильтрами. В противном случае велик риск выхода инструмента из строя. Обычно для использования пневматических инструментов необходимо использовать пневматические сети с давлением от 4 до 7 атмосфер.

Среди пневматических гайковертов выделяются гайковерты ударного (импульсного) типа – подгруппа 2С. Их отличием от точных пневматических гайковертов (подгруппа 2В) является зависимость обеспечиваемого момента затяжки от давления воздуха и мощности инструмента, обеспечиваемой конструкцией. Эти инструменты используются для затяжки такого типа соединений, где невозможно использование гайковертов обычной конструкции. Данные инструменты не используются для обеспечения конечного момента затяжки, т.к. они обеспечивают невысокую точность. Важной особенностью этих инструментов является зависимость выдаваемого ими момента затяжки от давления воздуха в пневматической системе. Также давление воздуха имеет большое влияние на срок службы данного типа инструментов. Пневматические гайковерты ударного типа обычно используются для так называемого предварительного завинчивания, то есть затяжки соединения на предварительный момент затяжки. Последующая затяжка до определенного технологическим процессом момента выполняется динамометрическим ключом, который и обеспечивает требуемую точность момента затяжки соединения. Операция предварительного завинчивания вводится для сокращения времени затяжки соединения.

Далее приведем классификатор многоскоростных программируемых шуруповертов и гайковертов. Разобьем их на подгруппы по следующим признакам:

- 1 – конфигурация;
- 2 – тип питания и связи с контроллером.

Классификатор многоскоростных программируемых шуруповертов и гайковертов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Классификатор многоскоростных программируемых шуруповертов и гайковертов применяемых в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений на предприятиях автомобилестроительного кластера

Table 2

Classifier of multi-speed programmable screws and wrenches used in the organizational and technological system to ensure mechanical assembly based on threaded connections at automotive cluster enterprises

	Код		Код	
1. Конфигурация	А	шуруповерты	А_1	с пистолетной рукоятью
			А_2	с прямой рукоятью
	В	гайковерты	В_1	с пистолетной рукоятью
			В_2	прямые гайковерты
			В_3	угловые гайковерты
2. Тип питания и связи с контроллером	А	аккумуляторный беспроводной		
	В	питание и связь по кабелю		

Например, программируемый угловой гайковерт со связью между инструментом и контроллером по кабелю в разработанной классификации будет иметь обозначение $3_{1B_3}^{2B}$. В данном обозначении 3 – многоскоростные программируемые шуруповерты и гайковерты; $1B_3$ – угловой гайковерт; $2B$ – по кабелю.

Рассмотрим более подробно получившие широкое распространение в последние десятилетия многоскоростные программируемые шуруповерты (подгруппа 1А) и гайковерты (подгруппа 1В), позволяющие программировать скорость затяжки соединения. Данные инструменты имеют электрический привод и состоят из программируемого устройства – контроллера и инструмента (гайковерта), выполняющего операцию затяжки соединения. Связь между инструментом и контроллером обычно осуществляется с помощью кабеля (подгруппа 2В), однако существуют модели с возможностью беспроводного соединения

(подгруппа 2А).

В последние годы распространение получают программируемые инструменты, сочетающие в себе возможности как обычного инструмента для затяжки резьбовых соединений, так и инструмента импульсного типа. При этом точность инструмента, при использовании его в качестве импульсного приближается к точности обычной затяжки. Другим важным преимуществом импульсного режима работы является возможность уменьшать силу реакции. Однако при этом возрастает вибрация инструмента при работе.

Основное отличие программируемого сборочного инструмента от непрограммируемого состоит в том, что данный тип сборочного инструмента позволяет проследить историю всех выполненных затяжек. Так как он позволяет хранить данные о параметрах нескольких тысяч последних затяжек. В число хранимых параметров могут быть включены данные о серийном номере произведенного изделия, времени его изготовления, значениях момента и угла затяжки соединения, что обеспечивает наблюдаемость процесса и возможность оперативной визуальной сигнализации, при выходе процесса за поле допуска. Другим отличием данного типа сборочных инструментов является возможность осуществлять предварительную и окончательную затяжку с различными скоростями, а также делать паузу для снятия внутренних напряжений в болте между различными фазами затяжки.

Программируемые гайковерты и шуруповерты позволяют изменять скорости закручивания для выбора оптимальной скорости для конкретного типа соединения и, таким образом, повышая качество и, следовательно, надежность данного соединения. Поэтому данный тип инструмента, как правило, используется для наиболее важных соединений, влияющих на безопасность эксплуатации изделия. Программа позволяет сохранять данные о каждой затяжке: информация о качестве выполнения затяжки, время выполнения, серийный номер инструмента, номер изделия, для которого была выполнена затяжка. Возможность отслеживаемости параметров выполненной операции закручивания, присутствующая в программируемых инструментах, позволяет выявить возможный дефект на ранней стадии. Поэтому программируемые инструменты, при правильном их применении, способны обеспечивать высокий уровень качества продукции и сократить издержки на выявление и исправление брака. Однако программируемые промышленные инструменты для сборочных операций очень дороги, цена одного инструмента может достигать нескольких сотен тысяч рублей. Стоимость подобных инструментов на территории Российской Федерации значительно больше, чем в Европе и США, поскольку данный тип инструмента в России не производится, а таможенные пошлины и наценка дистрибьютора на него очень высоки. Использование средств интеграции с автоматизированными системами сквозного контроля производства делает использование программируемого сборочного инструмента еще более дорогостоящим, однако обеспечивает отслеживаемость параметров выполненного соединения и позволяет оперативно реагировать на возникающие в процессе производства дефекты. В этом случае все программируемые сборочные инструменты связываются в общую систему, управляемую программируемыми логическими контроллерами, имеющую общую базу данных.

Сборочное оборудование, используемое в СОМС АСУТП, должно подвергаться калибровке с помощью средств изменения момента затяжки с различной периодичностью, а также проходить входной контроль перед передачей в производство. Рассмотрим классификатор сборочного оборудования СОМС АСУТП в зависимости от возможности калибровки. Сборочные инструменты для затяжки резьбовых соединений по условиям калибровки, с точки зрения удобства и возможности их калибровки, можно подразделить на следующие группы:

- 1 – инструменты, которые возможно калибровать на стационарных стендах измерения момента затяжки;
- 2 – инструменты, которые возможно калибровать на передвижных стендах измерения момента затяжки;
- 3 – инструменты, которые возможно калибровать на переносных стендах измерения

момента затяжки.

Все сборочные инструменты, используемые в СОМС АСУТП, проходят настройку и периодическую калибровку с помощью оборудования контроля и поверки. Условием использования промышленных инструментов является возможность получать подтверждение соответствия фактического момента затяжки, на который настроен инструмент, моменту затяжки указанному в технологическом процессе на ту или иную сборочную операцию. Некоторые сборочные инструменты ССО из-за своей конфигурации могут настраиваться и проходить калибровку на различных типах стендов, некоторые – только на одном типе стенда.

Результаты

Алгоритм оптимального формирования ССО на основе критериев оптимальности представлен в табл. 3. Данный алгоритм является средством поддержки управленческого решения и обеспечивает принятие оптимального решения по управлению ПСО вне зависимости от уровня подготовки лица, принимающего решение (ЛПР) в управлении подсистемами СОМС АСУТП.

Таблица 3

Алгоритм оптимального формирования совокупности сборочного оборудования на основе критериев оптимальности

Table 3

Algorithm for optimal generation of assembly equipment on the basis of optimality criteria

Этапы алгоритма	Содержание этапа	Применяемые методы
1. Определение номенклатуры и количества сборочных соединений	1. Определить совокупность моментов затяжки, выполняемых ξ -й подгруппой оборудования. 2. Представить совокупность моментов затяжки в виде упорядоченного множества.	Методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа
2. Выбор по критериям оптимальности	1. Упорядочить множество возможных моделей (артикулов) элементов ξ -й подгруппы оборудования по увеличению приведенной стоимости операции затяжки. 2. Сформировать необходимое и достаточное множество моделей (артикулов) элементов ξ -й подгруппы оборудования путем исключения из множества совокупность моментов затяжки тех моментов затяжек, которые будут выполняться оборудованием с меньшей приведенной стоимостью сборочной операции. 3. Согласовать цену i -й модели инструмента по критерию согласования принятого решения.	
3. Определение необходимого количества единиц оборудования каждой модели (артикула)	1. Сформировать необходимое и достаточное множество моделей инструментов ξ -й подгруппы оборудования. 2. Определить количество элементов i -й модели (артикула) ξ -й подгруппы оборудования, просуммировав количество элементов, настроенное на моменты затяжки из диапазона данной модели (артикула).	

Рассмотрим подробнее этапы алгоритма формирования ССО на основе критериев оптимальности. Алгоритм разработан для формирования совокупности оборудования 1, 2 и 3 подгрупп оборудования, рассмотренных в классификаторе. Для оборудования 4-й подгруппы (технологические приспособления, биты, адаптеры) формирование совокупности оборудования происходит аналогичным образом.

1. Совокупность моментов затяжки, выполняемых ξ -й подгруппой оборудования, можно представить в виде упорядоченного множества:

$Z_{\xi} = \{z_{\xi 1}, z_{\xi 2}, \dots, z_{\xi j}, \dots, z_{\xi n-1}, z_{\xi n}\}$, где n – количество различных значений момента затяжки, выполняемых данной подгруппой оборудования; ξ – подгруппа оборудования, $z_{\xi j}$ – числовое значение j -го момента затяжки, измеренное в Н·м.

$Z_{\xi} \in \{3N_{\xi \min} \dots 3N_{\xi \max}\}$, где $3N_{\xi \min}$ – минимальный момент затяжки для инструментов ξ -й подгруппы оборудования, $3N_{\xi \max}$ – максимальный момент затяжки для инструментов ξ -й подгруппы оборудования.

2. Сформировать для каждой i -й модели (артикула) количество γ_j сборочных инструментов с моментом затяжки z_j , т.е. сформировать множество $\Gamma_{\xi} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_{n-1}, \gamma_n\}$ на основе технологического процесса, с учетом количества точек применения инструментов ξ -й подгруппы с j -м значением момента затяжки.

Для $\forall i$ по техническим характеристикам оборудования определить $3N_i = \{z_{j-l}, \dots, z_j, \dots, z_{j+m}\} \in Z_{\xi}$, где $j-l \dots j+m$ – числовые величины моментов затяжки, выполняемых сборочным инструментом i -й модели, $3N_i$ – множество возможных настроек данного инструмента на требуемые моменты затяжки из множества Z_{ξ} .

3. Для оптимального выбора оборудования по критерию оптимального управления – минимизации стоимости ССО, введем понятие минимальной приведенной стоимости сборочной операции i -й модели инструмента из множества I_{ξ} возможных моделей сборочных инструментов для каждой ξ -й подгруппы оборудования:

$C_i = \frac{ЦП_i}{\Xi_i}$, где $ЦП_i$ – закупочная цена i -й модели инструмента, Ξ_i – ресурс оборудования, выраженный в количестве затяжек за время эксплуатации.

В разработанном алгоритме предлагается упорядочить множество моделей сборочных инструментов для каждой ξ -й подгруппы оборудования по увеличению приведенной стоимости одной операции затяжки C_i , чтобы $\forall i, C_i \leq C_{i+1}$.

Важным является учет величины ресурса затяжек не по данным предоставляемым производителем оборудования, а по наколенной в различных филиалах корпорации статистике практического использования данного оборудования. Таким же образом собирается статистика по 4-й группе (адаптеры, биты, головки и технологическая оснастка), т.к. надежность различных элементов 4-й группы бывает разной, а в случае поломки данного элемента сборочное соединение затянуть невозможно.

4. Согласовать цену i -й модели инструмента $ЦП_i$ по критерию согласования принятого решения. Цена должна быть в пределах $ЦП_{i \min} \leq ЦП_i \leq ЦП_{i \max}$, где $ЦП_{i \min} = Y_{i \min}$, $ЦП_{i \max} = Y_{i \max}$, $ЦП_{i \min}$ – нижний установленный головным предприятием предел цены i -й модели инструмента, $ЦП_{i \max}$ – верхний установленный головным предприятием предел цены i -й модели инструмента.

5. Сформировать I_{ξ} – необходимое и достаточное множество моделей инструмента ξ -й подгруппы и уточнить требуемые множества затяжек для каждой i -й модели инструмента путем исключения из $3N_i$ значений моментов затяжек, которые будут выполняться оборудованием с меньшей приведенной стоимостью. В результате множество I_{ξ} будет включать выбранные модели инструментов минимальной достаточной номенклатуры. Непересекающиеся подмножества $3N_i$ содержат упорядоченные по возрастанию множества значений моментов затяжек для каждой выбранной модели инструмента и безызбыточно покрывают все требуемое для производства множество моментов затяжки, т.е. $\cup_i 3N_i = Z_{\xi}$.

6. Для каждой i -й модели инструмента сформировать множество инструментов $\Gamma N_i = \{\gamma_{j-l}, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_{j+m}\} \in \Gamma_{\xi}$, для выполнения этой операции используются полученные подмножества $3N_i$. Множества ΓN_i формируются путем последовательной разборки множества Γ_{ξ} на подмножества по правилу: $\forall i$ если $z_j \in 3N_i$, то $\gamma_j \in \Gamma N_i$.

Таким образом, результатом формирования совокупности сборочного оборудования для ξ -й подгруппы является:

I_{ξ} – минимально необходимое и достаточное множество используемых моделей оборудования ξ -й подгруппы, отобранных с учетом минимальной приведенной стоимости одного соединения;

$3H_i = \{3_j, 3_{j+1}, 3_{j+2} \dots 3_{j+m}\} \in 3_\xi$ – множество моментов затяжки для каждой i -й модели инструмента;

$\Gamma H_i = (\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_j, \dots, \Gamma_{n-1}, \Gamma_n)$ – количество инструментов i -й модели инструмента, настраиваемых на моменты из множества $3H_i$.

Упорядочивание множества I_ξ по увеличению C_i , обеспечивает рациональный выбор инструментов и, как следствие, значительное снижение производственных затрат.

Необходимо отметить, что в ряде производственных случаев алгоритм потребует адаптации с учетом возможности выполнения одним инструментом, настроенным на определенный момент затяжки нескольких сборочных соединений. На практике, для крупносерийных и массовых сборочных производств это возможно когда выполняемые соединения находятся в непосредственной близости друг от друга, и последовательное выполнение нескольких операций не приводит к неоправданному увеличению времени цикла. Также достоинством использования в СОМС АСУТП программируемых инструментов является возможность программирования каждого инструмента данного типа для выполнения операций с несколькими различными моментами затяжки (на практике, обычно не более 8 различных моментов затяжки для одного инструмента). В этих случаях, достаточно скорректировать $3H_i$ и Γ_i .

Приведем пример применения разработанного алгоритма формирования оптимальной совокупности сборочного оборудования: если для выполнения затяжки j -м сборочным инструментом с моментом затяжки $3_j = 50$ Н·м. В табл. 4 представлены варианты возможных моделей оборудования с ценами и приведенными стоимостями. В таблице указаны цены моделей оборудования и ресурс затяжек не по данным предоставляемым производителем оборудования, а по накопленной в различных филиалах корпорации статистике практического использования данного оборудования.

Таблица 4

Пример практического использования алгоритма формирования оптимальной совокупности сборочного оборудования

Table 4

Example of practical use of the algorithm for generating the optimal assembly equipment

Модель оборудования	Закупочная цена модели оборудования, руб.	Ресурс оборудования, сборочных операций	Приведенная стоимости сборочной операции, руб/сборочная операция
№1	1 660 000	553 000	3,0
№2	1 020 000	255 000	4,0
№3	1 485 000	450 000	3,3
№4	2 530 000	684 000	3,7
№5	1 620 000	385 000	4,2
№6	2 360 000	526 000	4,5

При выборе самого дешевого варианта, модели №2, приведенная стоимость сборочной операции, будет равна 4 руб/сборочная операция; при случайном выборе модели инструмента ожидаемая приведенная цена одной затяжки составит:

$$C = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 C_i = 1/6 (3 + 4 + 3,3 + 3,7 + 4,2 + 4,5) = 3,78.$$

При использовании разработанной методики выбирается модель с наименьшей приведенной стоимостью, т.е. в рассматриваемом примере модель №1. Таким образом, для рассмотренного случая методика обеспечивает снижение стоимости затяжки на $\frac{3,78-3}{3} \cdot 100 \% = 26 \%$. Приведенная стоимость сборочной операции для других элементов ССО и оборудования контроля и поверки считается таким же образом.

Заключение

Модель ССО включает подробное математическое описание элементов ССО. Модель применяется для поддержки принятия решений по оптимальному формированию СОМС АСУТП. Отличительной особенностью стало то, что разработанные модели описания ССО и ее элементов позволяют накапливать и сохранять информацию об элементах ССО необходимую для эффективного управления сборочным производством. Также модели дают наглядное и понятное представление о видах оборудования, участвующего в сборке изделия, и упрощают работу технолога по выбору необходимых сборочных инструментов, применяемых в СОМС АСУТП. Принципиальным отличием разработанных классификаторов стала классификация в зависимости от степени автоматизации процесса затяжки и конструкции сборочного инструмента, а также в зависимости от удобства и возможности калибровки сборочного инструмента. Классификаторы применяются для декомпозиции совокупности оборудования используемой в сборке на основе резьбовых соединений на предприятиях автомобилестроительного кластера и поддержки принятия оптимальных решений по созданию и управлению СОМС АСУТП. Основной отличительной характеристикой предложенного алгоритма стало использование приведенной стоимости сборочной операции, позволяющей формировать оптимальную ССО. Разработанный алгоритм применяется при формировании ССО на предприятиях автомобилестроительного кластера и на предприятиях с похожей организационно-технологической системой обеспечения механической сборки. Алгоритм используется на этапе выбора ЛПР наилучшего решения о формировании ССО с учетом разработанных критериев оптимальности.

Список источников:

1. **Теория** автоматического управления: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.Н. Брюханов, М.Г. Косое, С.П. Протопопов и др. / Под ред. Ю.М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 268 с.
2. **Проектирование** машиностроительного производства [Электронный ресурс]: учебник / В.П. Вороненко, М.С. Чепчуров, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 416 с. – ISBN 978-5-8114-4519-6.
3. **Управление** системами и процессами: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.П. Смоленцев, В.П. Мельников, А.Г. Схиртладзе / под ред. В.П. Мельникова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
4. **К вопросу** выбора степени автоматизации сложных сборочных производств. – Труды XII Российской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления», Калуга, 5 июня 2013 г. – Калуга: Издательство «Ноосфера», 2013. – 494 с.
5. **Шабанов, А.А.** Методика рационального выбора совокупности сборочного оборудования в управлении производством. – Труды XIV Российской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления», Калуга, 3 июня 2015 г. – Калуга: Издательство «Ноосфера», 2015. – 422 с.
6. **Гулия, Н.В., Клоков, В.Г., Юрков, С.А.** Детали машин. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 416 с.

References:

1. Bryukhanov V.N., Kosoe M.G., Protopopov S.P. et al. Automatic Control Theory. Moscow: Vysshaya shkola, 2000. 268 p.
2. Voronenko V.P., Chepchurov M.S., Skhirtladze A.G. Design of Machine-Building Production. St. Petersburg: Lan, 2019. 416 p. ISBN 978-5-8114-4519-6.
3. Smolentsev V.P., Melnikov V.P., Skhirtladze A.G. Process and System Control. Moscow: Publishing Centre «Academy», 2010. 336 p.
4. To the Issue of Choosing the Automation Degree of Complex Assembly Plants. Proceedings of the 12th Russian Scientific and Technical Conference «New Information Technologies in Communication and Control Systems», Kaluga, June 5, 2013. Kaluga: Publishing house «Noosphere», 2013. 494 p.
5. Shabanov A.A. Methodology for the Rational Choice of the Assembly Equipment in Production Management. Proceedings of the 14th Russian Scientific and Technical Conference «New Information Technologies in Communication and Control Systems», Kaluga, June 3, 2015. Kaluga: Publishing house «Noosphere», 2015. 422 p.
6. Gulia N.V., Klokov, V.G., Yurkov S.A. Machine Parts. Moscow: Publishing Centre «Academy», 2004. 416 p.

Информация об авторах

Алексей Александрович Шабанов

тел.: +79206113590, соискатель кафедры
«Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО
«Брянский государственный технический
университет»

Елена Эдуардовна Аверченкова

доцент, кандидат технических наук,
тел.: +79038691330, доцент кафедры «Цифровая
экономика» ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

Владимир Иванович Аверченков

профессор, доктор технических наук,
тел.: +7(4832) 56-05-33, профессор кафедры
«Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО
БГТУ, заслуженный деятель науки РФ

Information about authors:

Alexey Alexandrovich Shabanov

tel.: +79206113590, applicant of the department
«Computer Technologies and Systems» of FSBEI HE
«Bryansk State Technical University»

Elena Eduardovna Averchenkova

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
tel.: +79038691330, Associate Professor of the
Department «Digital Economy», Bryansk State Technical
University, Bryansk, Russia

Vladimir Ivanovich Averchenkov

Professor, Doctor of Technical Sciences, tel. : +7(4832)
56-05-33, Professor of the Department «Computer
Technologies and Systems» of Federal State-Owned
Publicly-Funded Institution of Higher Education Bryansk
State Technical University, Honoured Worker of Science
of the Russian Federation

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 17.02.2022;
принята к публикации 18.02.2022.**

**The article was submitted 31.01.2022; approved after reviewing 17.02.2022; accepted for
publication 18.02.2022.**

Рецензент – Вершинин Е.В., кандидат физико-математических наук, доцент, Московский
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

Reviewer – Vershinin E.V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate
Professor, Bauman Moscow State Technical University.