

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА С РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

FEATURES OF HUMAN INTERACTION WITH A ROBOTIC SYSTEM IN THE PRODUCTION PROCESS

**V. Medunetsky
M. Serzhantova**

Summary. The article briefly considers the assembly and assembly process module, which provides technological flexibility in the assembly of products. It is noted that to further increase technological flexibility in small-scale production of products, a human specialist should be introduced into the assembly process by this technological module. It is noted that there is a need to evaluate the performance of a human specialist to reduce the likelihood of erroneous actions on his part. The article provides mathematical dependencies that allow us to evaluate the change in the performance of a human specialist during the daily production cycle.

Keywords: assembly and assembly process module, technological flexibility, performance of a human specialist in the technological process.

Медунецкий Виктор Михайлович

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
vm57med@yandex.ru

Сержантова Майя Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
xyz43210@mail.ru

Аннотация. В статье кратко рассмотрен сборочно-комплектующий технологический модуль, который обеспечивает технологическую гибкость при сборке изделий. Отмечается, что для дополнительного повышения технологической гибкости при мелкосерийном производстве изделий следует в процесс сборки данным технологическим модулем ввести человека-специалиста. При этом отмечается, что возникает необходимость оценивать работоспособность человека-специалиста с целью снижения вероятности возникновения ошибочных действий с его стороны. В статье приводятся математические зависимости, которые позволяют оценивать изменение работоспособности человека-специалиста в течение дневного производственного цикла.

Ключевые слова: сборочно-комплектующий технологический модуль, технологическая гибкость, работоспособность человека-специалиста в технологическом процессе.

Современное промышленное производство многогранно и непрерывно претерпевает изменения относительно потребностей общества. В настоящее время при массовом и крупносерийном производстве всё также распространена автоматизация и роботизация при изготовлении изделий. Для повышения эффективности производственных процессов сейчас активно внедряются технологии цифровых двойников, искусственный интеллект, интернет вещей и облачные вычисления. На практике также достаточно широко используются сформированные базы данных и базы знаний, что позволяет качественно конструировать изделия и обеспечивать технологическую подготовку производства для их дальнейшего изготовления. При этом роль человека в производстве сводится в основном к разработке программного обеспечения конкретного технологического процесса и настройки собственно производственно-технологического процесса (пуско-наладочные работы).

Все эти тенденции не обошли стороной и серийные и мелкосерийные производства малогабаритных изделий. Однако, следует отметить, что в этой серийной об-

ласти имеется определённая специфика. В некоторых технических сферах возникает потребность в различных модификациях основного изделия по требованиям заказчиков при небольших партиях их изготовления. К примеру, это сейчас особенно актуально в сборочно-комплектующих производствах, так как сборочные операции значительно влияют на технико-экономические показатели изделий [1, 2].

Поэтому возникает потребность в так называемой технологической гибкости производства, под которой принято понимать способность перехода с изготовления одного вида изделия на другой с минимальными изменениями технического оборудования. В частности, варианты обеспечения технологической гибкости подробно рассмотрены в работе [3]. Дальнейшее развитие этой темы, к примеру, представлено в работе [4], где предложен и рассмотрен сборочный технологический модуль, который повышает технологическую гибкость сборочной роботизированной линии. В основе этого модуля лежит компактная круговая распределительная система, которая обеспечивает передачу деталей для

сборки и частично собранные изделия от одного робота к другому в любых сочетаниях для соответствующих сборочных операций, а роботы расположены по окружности относительно данной распределительной системы. При этом следует отметить, что каждый манипулятор робота оснащён своим захватным устройством определённого типа. Основу распределительной системы представляет двухуровневый круговой стол, который состоит из двух подвижных частей с возможностью поворота каждой части относительно своей оси. В верхней части стола имеются проёмы (окна) для доступа манипуляторов к нижней части.

Такая компоновка сборочно-комплектующего модуля обеспечивает технологическую гибкость, то есть возможность эффективного перехода от сборки одного изделия к другому при минимальных комплексных затратах.

Если взять за основу такой сборочно-комплектующий технологический модуль, то можно ещё больше (дополнительно) повысить его технологическую гибкость, если ввести в этот технологический процесс человека-специалиста по сборке. Он также должен выполнять некоторые сборочные операции в данной технологической цепочке и выполняет те технологические операции, которые роботы, имеющие определённые захватные устройства, не могут выполнить при сборке какого-либо модифицированного изделия. Кроме того, для некоторых сборочных операций следует использовать какие-либо приспособления, которыми можно оснастить рабочее место человека-специалиста. При этом обеспечивается его взаимодействие с роботами через распределительную систему. Таким образом, получается комбинированная технологическая система взаимодействия человека с техническими «интеллектуальными» устройствами (оборудованием).

Исходя из вышеизложенного, возникает проблема обеспечения надёжности функционирования такой технологической системы и проблема работоспособности человека, который непосредственно участвует в этой системе.

Эти проблемы также подсказаны нынешним состоянием теории и практики эксплуатации современных сложных управляющих комплексов, встраиваемых в техническую среду технологических процессов, дополненную фактором наличия в ее составе человека-специалиста. Известно, что многие российские и зарубежные исследователи в той или иной мере рассматривают это направление [5, 6, 7]. Тенденция усложнения функций динамических систем приводит к соответствующим требованиям, обязательным условием которой является обеспечение их устойчивости, а также инвариантности качества производимой продукции относительно из-

меняющихся сигнальных и параметрических условий. Это породило потребность в исследовании особенности взаимодействия человека с робототехнической системой в производственном процессе. Следует отметить, что проблема взаимодействия человека с робототехнической системой как «системная парадигма» появилась в последние годы и еще окончательно не оформилась, и это несмотря на очевидный факт, что всё с течением времени меняет свои показатели работоспособности и надёжности. Проблема контроля работоспособности технических систем заметно усложняется, если в их составе присутствует человек-специалист [8]. Это усложнение связано с двумя факторами, первый из них порождается трудностью математической формализации его поведенческой деятельности, второй — возможной непредсказуемостью его поведения в определенных условиях функционирования. Последний фактор наглядно проявляется в сложных ситуациях, являющихся экстремальным проявлением частичной потери работоспособности и обычно именуемое термином «человеческий фактор».

Следует также отметить, что любая техническая антропогенная система, созданная интеллектом и непосредственно руками человека, характеризуется четырьмя стадиями существования. Первая стадия есть стадия разработки, которая создается в модельной информационной и алгоритмической среде. Вторая стадия представляет собой производство. Третья стадия — эксплуатация в составе обслуживаемого технологического процесса. Четвёртая стадия — утилизация. Задача контроля технической работоспособности особенно актуальна для первой и третьей стадий ее существования. На первой стадии в рамках системной парадигмы сложных динамических систем решается задача оценки априорной потери надёжности. На третьей стадии решается задача эксплуатационной оценки возможного его вырождения. Предпринятые авторами данной статьи исследования в своей теоретической части сориентированы на задачу контроля уровня физической работоспособности человека-специалиста в составе технологического процесса. Результаты исследования в основном направлены на рекомендации по организации технологической среды функционирования человека-специалиста и формирования команд из специалистов в случае, если технологический процесс требует коллективного обслуживания.

Приходится отметить, что состояние проблемы априорного контроля особенностей взаимодействия человека с робототехнической системой в технологическом процессе и контроля уровня его физической работоспособности на настоящий момент не полностью разработан. Отсутствует адекватный инструментарий аналитической количественной оценки. Разработке аналитического инструментария априорного контроля возможной работоспособности робототехнической си-

стемы в производственном процессе с учетом фактора наличия в их составе человека-специалиста в условиях интервального модельного представления функциональных компонентов производственного процесса посвящены предпринятые авторами исследования, положенные в основу данной статьи.

Робототехническая система с человеком-оператором в технологическом процессе может быть представлена линейным математическим оператор отображающим пространство целевых намерений в пространство осуществляемых реализаций. В математической постановке линейный оператор становится вырожденным [9], если размерности указанных пространств оказываются не согласованными, и эта несогласованность проявляется в уменьшении ранга линейного математического оператора. Следует заметить, что использование уменьшения ранга оператора отношения «вход — выход» системы в качестве показателя изменения физической работоспособности вырождения неудобно, так как ранг является целочисленной характеристикой матрицы, а потому характер его изменения является разрывным. Предлагается характеристикой в классе непрерывных использовать число обусловленности на основе семейства функционалов математического вырождения, вычисляемых на спектре сингулярных чисел матрицы линейного математического оператора именуемой критериальной.

Любая система может терять общую работоспособность, когда из ее состава выпадает некоторый функциональный элемент. Как следствие, сокращается размерность пространства осуществляемых реализаций. Причины изменения работоспособности могут носить организационный характер, когда формируемые целевые намерения неудачно распределяются по входам сложной динамической системы. Терять работоспособность могут системы по причине параметрической природы, когда неудачно организованы связи между каналами системы, неудачно назначены по знаку и величине коэффициенты передачи этих связей, когда неудачно сформированы полосы пропускания каналов, а в случае, если система имеет дискретную природу, неудачно назначены и распределены по каналам интервалы дискретности и т.д.

Низкий уровень общей работоспособности может стать следствием организации процессов в многоканальной динамической системе с человеком-специалистом в ее составе с функциональными компонентами, функционирующие в дискретном по времени режиме. Если каналы системы функционируют с интервалами дискретности, не согласованными с их полосой пропускания, то возникает опасность не только потери работоспособности, но и разрушения такой многоканальной системы.

И наконец, робототехнические системы с человеком-специалистом в их составе могут изменять свои показатели работоспособности по причине негативно-го проявления человеческого фактора, которую можно разделить на два типа: внутреннюю и внешнюю.

К внутренним причинам негативного человеческого фактора в рассматриваемой системе можно отнести: а) эмоциональное состояние человека на момент выхода его на работу и в течение рабочей смены, которое в системной постановке проявляется как ненулевое начальное состояние, порождаемое надпроизводственной средой, и отражается в виде неполного погружения его в процесс производственного функционирования; б) несобранность и неадекватная оценка ситуации; в) поведенческие особенности личности, его темперамент. К внешним причинам негативного человеческого фактора можно отнести: возникновение несанкционированных производственных бинарных отношений, несовершенство организации труда на производстве.

Оценка работоспособности как пользовательский показатель производственной системы, может осуществляться как в переходном, так и установившемся режимах функционирования системы, при этом наибольшее предпочтение следует отдать задаче контроля в установившемся режиме. Задача контроля работоспособности в априорной постановке в основном решается в классе аналитических соотношений, на основе критериальных матриц, сконструированных для отношения «вход-выход». Используемый инструментальный аппарат функционалов вырождения позволяет дать численную оценку близости системы к частичной или полной потере работоспособности при наличии критериальной матрицы, достаточно адекватно описывающей системный характер отношения «вход-выход» исследуемой системы.

Особенность и специфика взаимодействия человека с указанной выше робототехнической системой заключается в том, что при выполнении соответствующих технологических операций человек-специалист должен обладать соответствующей физической работоспособностью в течение заданного рабочего времени (производственного цикла).

Поэтому необходимо оценивать уровень работоспособности человека в течение производственного цикла с целью снижения вероятности возникновения ошибочных действий с его стороны.

Процесс изменения уровня работоспособности человека можно представить в виде обобщенной функции:

$$\eta(w) = N(w)\chi(w), \quad (1)$$

где: $N(w)$ — оценочная матрица системы «человек — технологический процесс», размерностью $m \times m$, в ко-

торой переменная w является временем, когда задача (1) решается для непрерывного времени, и дискретным временем k с числом интервалов дискретности длительностью Δt ;

$\eta(w), \chi(w)$ — m -мерные векторы, отметим, что $\chi(w)$ может быть равна $\chi(0)$.

Для наблюдения за изменением работоспособности системы взаимодействия человека с технической системой применим функционалы J_R , построенные на сингулярных числах $\alpha_j (j = \overline{1, m})$ оценочной матрицы N , таким образом

$$\sigma_\alpha \{N\} = \{\alpha_j = |\mu_j^{1/2}|\}; \quad (2)$$

$$\mu : \det(\mu I - N^T N) = 0; j = \overline{1, m}$$

и соответствует соотношению

$$J_R = \alpha_v / \alpha_1; v = \overline{m, 1} \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет оценивать уровень работоспособности во времени благодаря возможности наблюдения за изменениями значений оценочной матрицы. Отметим, что J_R задаются на интервале

$$0 \leq J_{Dv} \leq 1 \quad (4)$$

что делает их удобным инструментом для оценки работоспособности человека в производственном цикле.

Предположим, наличие форсирующих свойств у человека и сформируем передаточную функцию его работоспособности

$$[W_3(s)] = [k_3] \left[\frac{[T_{33}]s + 1}{([T_{31}]s + 1)^\mu} - \frac{1}{([T_{32}]s + 1)^v} \right] \cdot \frac{1}{s}, \quad (5)$$

где $[k_3]$ — интервальный коэффициент персонализированной производительности; $[T_{31}]$ — интервальная постоянная времени нарастания работоспособности в производственном цикле, степень μ формирует задержку роста работоспособности в начале цикла; $[T_{32}]$ — интервальная постоянная времени описывающая снижение работоспособности; $1/s$ — интегрирующее звено отражает результат выполнения человеком-оператором технологического задания по управлению системой в ручном режиме. Интервальная постоянная времени $[T_{33}]$, формирует форсирующие свойства человека [5].

В результате: на основе зависимости (5), в общем и целом, получено изменение уровня работоспособности человека в рамках производственного цикла, которое представлено в Таблице 1 и приводится на графике для наглядности (на Рис.1)

Таблица 1.

Работоспособность человека в производственном цикле

П.ц., час	0	1	2	3	4	5	6	7	8
R, у.е.	1.0	1.18	1.20	1.30	1.25	1.23	1.1	1.0	0.9

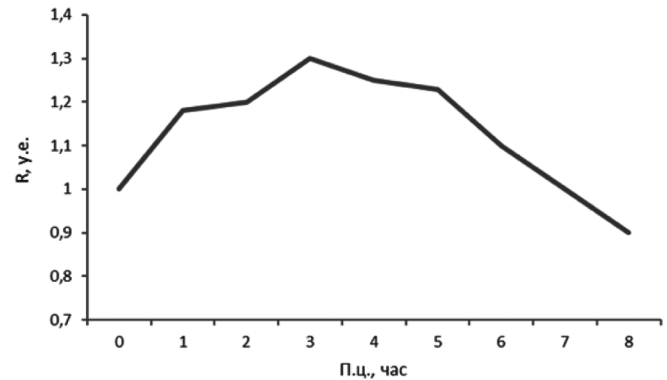


Рис. 1. График изменения уровня работоспособности человека в производственном цикле

В таблице 1 и на графике на Рис.1: П.ц. — производственный цикл в часах, R, у.е. — уровень работоспособности в условных единицах. Из содержания приведённой таблицы и графика видно, что в начале производственного цикла уровень работоспособности человека условно можно принять как 1, а далее с течением времени уровень работоспособности человека повышается и достигает максимума — 1,3. После достижения максимума начинается постепенный спад до исходного уровня и далее к окончанию выполняемых сборочных операций отмечается уровень работоспособности человека 0,9.

Таким образом, можно предположить, что в диапазоне третьего и четвертого часов производственного цикла вероятность ошибочных действий человека-сборщика минимальна, а к окончанию производственного цикла — максимальна. Поэтому для человека-сборщика во второй половине дневного производственного цикла (рабочего дня) необходимо предусматривать и распределять ему задания таким образом, чтобы снижать интенсивность его труда.

Дополнительно в качестве иллюстрации (Рис. 2) по приведенной далее последовательности зависимостей (б) можно графически представить процесс уменьшения работоспособности человека с максимального значения. В исходном виде — это окружность, а далее эта окружность трансформируется в эллипс с последовательным изменением его параметров, что соответствует уменьшению уровня работоспособности человека и конкретизирует этот процесс.

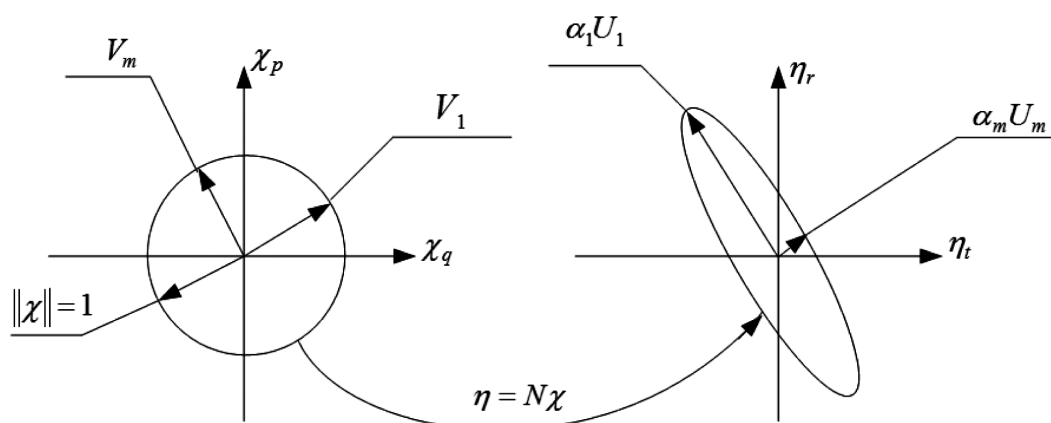


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация уменьшения уровня работоспособности человека с максимального значения до минимального

$$\eta = N\chi = \sum_{j=1}^m \gamma_j N V_j = \sum_{j=1}^m \gamma_j \alpha_j U_j \Rightarrow \begin{cases} \eta = \alpha_1 U_1 & \text{при } \chi = V_1 \\ \eta = \alpha_m U_m & \text{при } \chi = V_m \end{cases} \quad (6)$$

Вывод

В результате данного исследования по повышению технологической гибкости производства выявлена осо-

бенность и специфика взаимодействия человека с робототехнической системой на основе предложенных математических моделей. Выявлено, что уровень работоспособности человека следует учитывать в течение производственного цикла, в частности при сборочно-комплектующих технологических операциях малогабаритных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Ю.Г. Гибкие производственные системы. Справочник. Справочное издание, М., изд-во КНОРУС, 2022 г. — С.364.
2. Пономаренко М.В. Автоматизированные системы управления производством с точки зрения гибких производственных систем. Современное машиностроение: Наука и образование. Материалы 12-й Международной конференции под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича, СПб: Политех-пресс, 2023 г.
3. Николаев В.В. Повышение гибкости роботизированных сборочных линий многономенклатурного производства оптических приборов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО. СПб., 2018 [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008700118/, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2024).
4. Медунецкий В.М., Медунецкий В.В., Соляник А.Р., Ярышева Е.П. Обеспечение гибкости роботизированных технологических систем для сборки малогабаритных изделий. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 143–146. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-143-146
5. Roco M., Bainbridge W. (eds). *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Arlington, 2004.
6. Ястреб Н.А. Гуманитарная экспертиза конвергентных технологий как философская задача // Человек в техносреде: конвергентные технологии, глобальные сети, Интернет вещей. Сборник научных статей. Выпуск 1. Под ред. доц. Н.А. Ястреб. — Вологда.: ВоГУ, 2014. С. 188–195.
7. Швецова В.И. Современные методы оценки комфортности биоклиматических условий курортных местностей // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1 (43). С. 147–153.
8. Ушаков А.В., Сержантова М.В. Интервальная аддитивная кусочно-полиномиальная временная модель деятельности человека-оператора в квазистатической функциональной среде // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. №2., С.329–337
9. Гантмахер Ф.Н. Теория матриц. М.: Наука — 1966 г. — 576 С.

© Медунецкий Виктор Михайлович (vm57med@yandex.ru); Сержантова Майя Вячеславовна (xyz43210@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»