

УДК 621.002:629.12+621.796

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОГО СБОРОЧНО-СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЕРФИ**О. А. Щеголева¹, Е. Г. Бурмистров²**^{1,2}Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия¹ORCID: 0009-0001-5341-8799²ORCID: 0000-0003-0385-0847Статья **поступила** 19.03.2024, **принята** к публикации 02.07.2024. Опубликовано онлайн.

Аннотация. Сборочно-сварочное производство верфи является сложной производственной системой. Изучение функционирования отдельных её элементов, взаимосвязей между ними, откликов на возмущающие воздействия внешних и внутренних факторов в реальных условиях сложно, дорого, долго. Для этой цели уместно использовать цифровые технологии, основанные на методах математического моделирования, осо-

бенно если речь идёт о моделировании систем с потоковыми процессами. Применение такой практики позволит без значительных затрат различного рода ресурсов в короткие сроки найти оптимальное планировочное решение по составу и производительности оборудования, расстановке персонала и т.д.

Ключевые слова: цифровые технологии, математическая модель, гибкая производственная система, алгоритм управления моделью

DIGITAL MODEL OF FLEXIBLE ASSEMBLY AND WELDING MACHINE SHIPYARD PRODUCTION**Olga A. Shchegoleva¹, Evgeny G. Burmistrov²**^{1,2}Volga State University of Water Transport, Russia, Nizhny Novgorod

Abstract. The shipyard's assembly and welding production is a complex production system. Studying the functioning of its individual elements, the relationships between them, and responses to the disturbing influences of external and internal factors in real conditions is difficult, expensive, and time-consuming. For this purpose, it is appropriate to use digital technologies based on mathematical modeling methods, especially when it comes to modeling systems with flow processes. The use of this practice will allow, without significant expenditure of various types of resources, to quickly find the optimal planning solution for the composition and productivity of equipment, placement of personnel, etc.

Keywords: digital technologies, mathematical model, flexible production system, model control algorithm

Цифровизация процессов исследования характеристик гибких производственных систем (ГПС) является важной задачей научного обеспечения отечественного судостроения.

Сборочно-сварочное производство в полной мере является сложной системой, в которой, к тому же реализованы принципы поточного производства [1; 2].

Поэтому общую цель разработки цифровой модели соответствующей ПС для изготовления секций поточным методом можно свести к поиску оптимальных (рациональных) решений в части повышения технического уровня существующих технологических процессов и повышения уровня автоматизации управления ими.

При этом задача, по сути, сводится к алгоритмизации и математической формализации оптимальных взаимосвязей между позициями производственного потока и отдельными рабочими местами с учётом численности и квалификации персонала, количества и состояния средств технологического обеспечения (СТО).

Разработка модели включает в себя составление соответствующего алгоритма и его формализацию. Основной целью при этом является разработка алгоритмического представления функционирования ГПС, а главной задачей – формальное описание логико-математической модели ГПС.

Таким образом, станет возможным уже на ранних этапах подготовки производства к поточному выпуску секций выполнить всесторонний анализ характеристик ГПС, входящих в неё подсистем, их взаимосвязей между собой.

В свою очередь это позволит рассмотреть и оценить нескольких альтернативных вариантов моделей ГПС, повысить качество окончательно выбранного варианта.

Известно, что любая модель предполагает наличие инструментов воздействия на входные и выходные параметры моделируемого объекта для их варьирования в заданном диапазоне. Это позволит создать несколько альтернативных вариантов моделируемого объекта и получать в дальнейшем независимые оценки каждого варианта [3] с оценкой целевой функции с любой заданной степенью точности.

$$\begin{aligned} \xi^0(X_i) &= \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \xi(X^{j,l}) \\ \Delta T^0(X_i) &= \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \Delta T(X^{j,l}). \end{aligned} \tag{1}$$

Такой алгоритм позволяет вычислять общие оценки целевой функции сразу для всех значений $X \in XX_i^C$:

$$L(X_i) = \frac{\xi^0(X_i)}{\Delta T(X_i)}.$$

Точность оценок зависит от количества циклов регенерации.

$$L = \frac{\xi}{\Delta T}; \quad \xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i; \quad \Delta T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i,$$

где $\xi_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} \zeta(\tau) dt$ – интегральная оценка исследуемого процесса; N – число циклов регенерации; $\Delta T = T_i - T_{i-1}$ – длительность i -го цикла регенерации.

Для решения поставленной задачи можно применить принципы направленного управляемого эксперимента [2; 3]. С целью сокращения вычислительного ресурса при разработке модели удобно применить равномерную сетку пространства и управляемых параметров $XX^C \subset XX$. Задачей останется выбор:

$$X = \text{arc max } L(X), \quad X \in XX^C, \quad \text{где } L(X) = M \zeta_X.$$

Каждый j -й цикл алгоритма определяет пару соседних значений управляемого параметра $X^{j,l}$; $l=0,1$. Для каждой из них, на основании K циклов регенерации

$\xi(x^{j,l}) = \int_{t(2j+l)k_i}^{t(2j+l+1)k} \xi_{x^{j,l}}(\tau) dt$, где $\zeta_x^{j,l}(\tau)$ – выборочная траектория процесса $\zeta_x^{j,l}(\tau)$; τ_j – моменты регенерации модели, $\Delta T(X^{j,l}) = t(2j+l+1)k - t(2j+l)k$, рассчитывается целевая функция $L(X^{j,l})$:

$$L(X^{j,l}) = \zeta(X^{j,l}) / \Delta T(X^{j,l}).$$

В процессе моделирования для всех точек $X \in XX_i^C$ накапливаются величины $\xi^0(X_i)$ и $\Delta T(X_i)$:

С учётом изложенного, на рис. 1 представлена концептуальная схема цифровой модели ГПС поточного изготовления секций, где Π – производственный

цикл изготовления комплекта секций, t – такт выпуска сборочных единиц; P – ритм работы производственных участков.

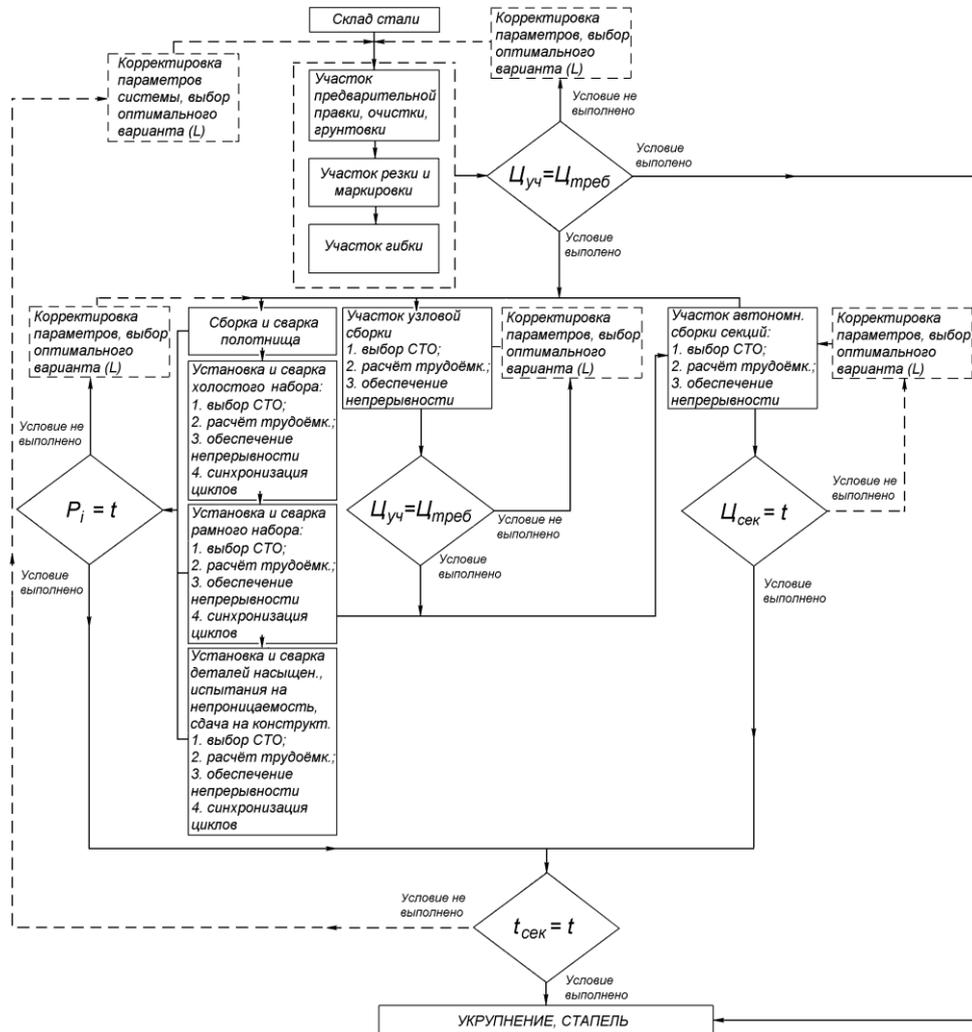


Рисунок 1. Алгоритм цифровой модели изготовления секций корпуса судна

В процессе «проигрывания» модели в ней будут накапливаться величины $\bar{\xi}^0(X_i)$ и $\Delta T(X_i)$ для всех точек сетки $X \in \mathbb{X}X_i^c$, где

$$\bar{\xi}^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l} = X_i} \bar{\xi}(X^{j,l}), \Delta T^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l} = X_i} \Delta T^0(X^{j,l}). \quad (2)$$

С учётом (2) по окончании моделирования можно вычислить целевую функцию для всех значений $X \in \mathbb{X}X_i^c$:

$$\bar{Y}(X_i) = \frac{\bar{\xi}^0(X_i)}{\Delta T(X_i)} \quad (3)$$

Дальнейшие действия зависят от конкретного состояния марковской цепи $C_i^+(C_i^+)$.

Стационарные вероятности состояний будут определяться равенством:

$$\pi_{i,l} = P_{ST}(C_{i-1}^+) \pi_{i,1} = P_{ST}(C_{i+1}^+),$$

вектор-строка стационарных вероятностей:

$$\bar{\pi} = (\pi_{0,2}, \pi_{1,1}, \pi_{1,2}, \dots, \pi_{I-1,2}, \pi_{i,1}),$$

а её составляющие удовлетворяют:

$$\bar{\pi} = \bar{\pi} p;$$

$$\sum_i \sum_j \pi_{ij} = 1.$$

Расчёт π лучше вести, определяя значения π_{ij} через $\pi_{0,2}$.

Если обозначить $\pi_0 = \pi_{ij}$, то:

$$\pi_0 = \pi_{1,1} \cdot q_i^+ + \pi_{1,2} \cdot q_i^-; \pi_{1,1} = \pi_0 \cdot 1.$$

Выражая из этих уравнений $\pi_{1,1}$ и $\pi_{1,2}$, получим:

$$\pi_{1,1} = \pi_0 \cdot 1,$$

$$\pi_{1,2} = \pi(\pi_0 - \pi \cdot q_1^+ \setminus q_1^- = \pi_0 \cdot p_i^- \setminus q_i^-).$$

Утверждение выполняется для $i=1$ и 2. Применив метод индукции для остальных значений (при $i>2$) получим:

$$\pi_{i,l} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{i-1} \frac{p_k^+}{q_k^-}, \quad i = \overline{2, I-1},$$

$$\pi_{i,2} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^i \frac{p_k^+}{q_k^-}, \quad i = \overline{2, I-1}.$$

Решая уравнения

$$\pi_{n,2} = \pi_{n+1,1} \cdot q_{n+1}^+ + \pi_{n+1,2} \cdot q_{n-1}^-;$$

$$\pi_{n+1,1} = \pi_{n,1} \cdot p_n^+ + \pi_{n,2} \cdot p_n^-$$

относительно $\pi_{n+1,1}$ и $\pi_{n+1,2}$ и подставляя значения $\pi_{n,1}, \pi_{n,2}$, получим:

$$\begin{aligned} \pi_{i+1,1} &= \left(\prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} p_n^+ + p_n^- \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \right) \cdot \pi_0 = \pi_0 \left(p_n^+ + \frac{p_n^-}{q_n^-} \right) \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \\ \pi_{i+1,2} &= \frac{\pi_0 \left(\prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} p_n^+ - q_{n+1}^- \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)}{q_{n+1}^-} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \cdot \frac{1 - q_{n+1}^-}{q_{n+1}^-} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{n+1} \frac{p_k^+}{q_k^-}. \end{aligned} \quad (4)$$

Получим $\pi_{1,1} = \pi_{l-1,2}$ и $\pi_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \sum_{j=2}^{j-1} \prod_{k=1}^{i-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)^{-1}$.

То есть, решение системы (4) будет для случая $\sum_{j=1}^l \prod_{k=1}^{i-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} < \infty$.

Предложенное математическое описание цифровой модели ГПС позволяет учитывать и факт того, что большая часть СТО, используемых в сборочно-сварочных цехах верфей, проектировалась с учётом различий в типах изготавливаемых СЕ, их большой номенклатуры и значительной массы. А также с учетом высоких требований к точности изготовления, минимизации

сроков сборки и сварки секций в общем цикле корпусостроительных работ, сложности синхронизации работ в цехе (цехах).

То есть, позволяет учитывать разницу в объёмах работ, выполняемых с помощью тех или иных СТО, и различия в длительности циклов этих работ. То есть, для вариантов моделей ГПС конструктивна идея создания и 3D-модели СТО [4].

Это позволит проектировать ГПС на качественно новом уровне, синхронизировать все этапы проектирования, настроить логистические взаимосвязи между существующими и вновь проектируемыми СТО, включить новые СТО в существующий производственный поток, адаптировать эргономику проектируемых СТО к конкретным производственным условиям, оптимизировать характеристики СТО, планировать проектирование СТО с учётом особенностей организации производства и т.п.

Список литературы

1. Фрейдина Е.В. Исследование систем управления: учебное пособие / Е.В. Фрейдина. – М.: Омега, 2008. – 367 с.
2. Галочкин Д.А., Бурмистров Е.Г. Применение метода имитационного моделирования при подготовке сборочно-сварочного производства судостроительной верфи : монография – Н. Новгород : Типография ООО «Мастер-плюс», 2013. – 151 с.
3. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
4. Галочкин Д.А., Огнев Н.В., Бурмистров Е.Г. Разработка программ поддержки

систем 3-D моделирования элементов производственных систем верфи // «Вестник ВГАВТ» выпуск 28, Н. Новгород, 2010. – С. 62 – 64.

References

1. Freydina E.V. Issledovanie sistem upravleniya [Research of control systems]. Moscow, Omega Publ., 2008, 367 p. (In Russ.).
2. Galochkin D.A., Burmistrov E.G. Primenenie metoda imitatsionnogo modelirovaniya pri podgotovke sborочно-svarochnogo proizvodstva sudostroi-tel'noy verfi [Application of the simulation modeling method in the preparation of assembly and welding production at a shipyard]. Nizhny Novgorod, Master-plus Publ., 2013, 151 p. (In Russ.).
3. Sovetov B.Ya. Modelirovanie sistem [Modeling of systems], 3rd ed., revised. and additional. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p. (In Russ.).
4. Galochkin D.A., Ognev N.V., Burmistrov E.G. [Development of support programs for 3-D modeling systems of elements of shipyard production systems]. Vestnik VGAVT, issue 28; 2010: pp. 62 – 64. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/ ABOUT THE AUTHORS

Ольга Анатольевна Щеголева, аспирант кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, shh151@mail.ru

Евгений Геннадьевич Бурмистров, д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, burmistrov_e_g@mail.ru

Olga A. Shchegoleva, Postgraduate at the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603951, Russia

Evgeny G. Burmistrov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603951, Russia