

УДК 62-1/-9

## РАЗРАБОТКА СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бурмистрова Анастасия Евгеньевна<sup>1</sup>, магистрант

e-mail: [sovvesna@yandex.ru](mailto:sovvesna@yandex.ru)

Михеева Татьяна Александровна<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент

e-mail: [miheevata@yandex.ru](mailto:miheevata@yandex.ru)

Щеголева Ольга Анатольевна<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: [shh151@mail.ru](mailto:shh151@mail.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Внедрение гибких производственных систем на производствах транспортной отрасли обладает рядом конкурентоспособным преимуществ. В настоящее время судостроение переживает этап «возрождения», но тем не менее сталкивается с рядом проблем, такими как: технологическая сложность, санкционное давление, изменчивость рыночного спроса и другие. Именно применение гибких производственных систем способно найти решение большинства этих вопросов, обладая рядом преимуществ в операционной гибкости и экономической эффективности.

**Ключевые слова:** гибкие производственные системы, сборочно-сварочное производство, современное судостроение, гибкость производства.

## DEVELOPMENT OF A STATIC MODEL OF A FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEM FOR ASSEMBLY AND WELDING PRODUCTION

Anastasia E. Burmistrova<sup>1</sup>, Master's Degree Student

e-mail: [sovvesna@yandex.ru](mailto:sovvesna@yandex.ru)

Tatiana A. Mikhееva<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: [miheevata@yandex.ru](mailto:miheevata@yandex.ru)

Olga A. Shchegoleva<sup>1</sup>, Doctoral Student

e-mail: [shh151@mail.ru](mailto:shh151@mail.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The introduction of flexible production systems in the transport industry has a number of competitive advantages. Currently, shipbuilding is undergoing a «renaissance» stage, but nevertheless it faces a number of problems, such as technological complexity, sanctions pressure, market demand variability, and others. It is the use of flexible production systems that can solve most of these issues, with a number of advantages in operational flexibility and cost-effectiveness.

**Keywords:** flexible production systems, assembly and welding production, modern shipbuilding, production flexibility.

Производство судовых секций является ключевым этапом постройки судна. Этот процесс следует чёткому алгоритму и включает в себя несколько обязательных шагов:

1) Резка металла. Это первая и важнейшая стадия в производстве судовых секций. От точности и качества резки зависят все последующие процессы сборки и сварки. В современных условиях судостроительные предприятия активно внедряют автоматизированные и цифровые технологии, чтобы повысить эффективность и снизить затраты на производство. Для резки металла используют плазменную, лазерную, газовую (кислородную) и гидроабразивную резку.

2) Сборка деталей. Здесь отдельные детали (листы, профили, узлы) комплектуются в принадлежности к той или иной секции или блоку, чтобы затем производственный процесс продолжился этапом сборки секций.

3) Сборка секций. На этой стадии производства важнейшее значение имеет работа специалистов сборочного и сварочного производства, а также группы размерного контроля. Именно этим людям необходимо соединить отдельные детали в крупные (укрупнённые) элементы корпуса судна.

4) Сварка и обработка швов. Определяют прочность, долговечность и надёжность корпуса судна.

5) Формирование корпуса. На этом этапе в эллинге или на открытом стапеле формируется корпус будущего судна из готовых секций [1].

Отметим, что вышеуказанные процессы описаны с точки зрения действия современного производства. В нынешних условиях судостроение становится всё более точным и гибким благодаря внедрению робототехники, цифровых технологий и новых методов, автоматизированных и роботизированных управления производством.

Процесс производства судовых секций, безусловно, представляет собой сложную производственную систему (ПС).

Под сложной производственной системой понимают интегрированный комплекс, который объединяет автоматизированное проектирование и компьютерное управление изготовлением сборных узлов [2].

В данной системе происходит многоуровневое взаимодействие: как между её отдельными компонентами, так и между этими компонентами и внешними факторами, которые могут выступать в роли возмущающих воздействий (рис. 1).

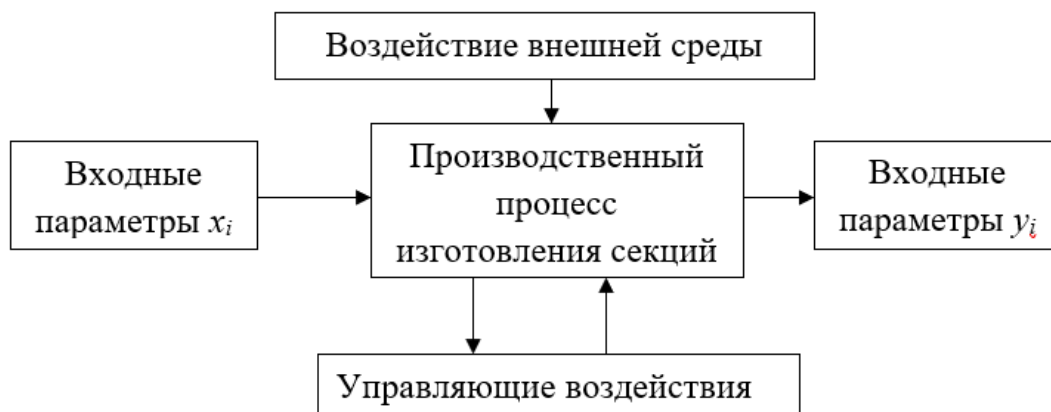


Рисунок 1 – Схема взаимодействий в ПС изготовления секций

Примем, что входные параметры системы составляют факторы ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ), а численные характеристики целей исследования – параметрами оптимизации ( $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ ) [3].

Под математической моделью, в общем виде, будем понимать уравнение, связывающее параметры оптимизации с факторами:

$$y = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

Статистическое моделирование производственных потоков в сборочно-сварочном производстве (ССП) представляет собой эффективный метод анализа системных характеристик и их взаимосвязей. Данный подход позволяет на основе расчётных параметров оптимизации определить наиболее адаптивную («гибкую») модель производственной системы.

В данном случае могут рассматриваться различные варианты организации производственного процесса, включая:

- 1) Полностью автоматизированные решения
- 2) Комбинированные системы с частичной механизацией
- 3) Традиционные схемы с ручным выполнением операций.

Целевые функции  $y$  в общем виде можно представить:

$$\begin{cases} L = \min(F^j, F^{j+1} \dots F^{j+n}) \\ F^j = f(y_i) \\ x_i = \text{const} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $L$  – совокупность процессов (оптимальная);

$F_j$  – альтернативные формы организации производства.

В качестве условия решаемой задачи можно принять определение наиболее «гибкого» варианта производственной системы сборочно-сварочного производства.

Гибкой производственной системой (ГПС) принято считать ту, которая способна быстро и верно реагировать на изменения в поставленной задаче. Преимуществами таких систем традиционно считают:

1. Повышение производительности труда;
2. Повышение эффективности производства;
3. Сокращение производственного времени;
4. Уменьшение стоимости производства.

Чтобы сборочно-сварочное производство обладало преимуществами, характерными для гибких производственных систем (ГПС), необходимо провести сравнительный анализ различных форм организации производства. Сравнение должно учитывать влияние внешних факторов в зависимости от конкретной производственной ситуации, при этом входные параметры для всех рассматриваемых вариантов должны оставаться неизменными.

Ключевые входные параметры задачи: конструктивно-технологические особенности ( $C_{\text{сек}}$ ) и масса ( $M_{\text{сек}}$ ) секций, численность производственного основного персонала ( $m_{\text{о.р.}}$ ), количество изготавливаемых секций ( $N_{\text{сек}}$ ), максимальный фонд производственного времени, выделенного на изготовление серии секций ( $\Phi$ ), величина удельной трудоёмкости ( $T_i^{\text{сек}}$ ),  $t = \Phi/N_{\text{сек}}$  – планируемый такт выпуска секций, ч/ед.

Конструктивно-технологические особенности ( $C_{\text{сек}}$ ) и масса ( $M_{\text{сек}}$ ) определяются типовыми характеристиками секций.

Параметры  $N_{\text{сек}}$ ,  $C_{\text{сек}}$ ,  $M_{\text{сек}}$  и  $m_{\text{о.р.}}$  остаются постоянными для всех альтернативных вариантов.

Удельная трудоёмкость ( $T_{\text{сек}}$ ) рассчитывается на основе  $C_{\text{сек}}$  и  $M_{\text{сек}}$  с использованием методов пооперационного нормирования и также является фиксированной величиной для всех рассматриваемых вариантов.

Нормирование технологического процесса производится с использованием известных [4] зависимостей по формулам вида:



$$\begin{cases} T_i^{\text{сек}} = \sum_{i=1}^n T_i; \\ T_i = f(k_{\text{пр}}, M_{\text{сек}}, C_{\text{сек}}); \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_i^{\text{сек}}$  – фактическая трудоёмкость изготовления типовой секции, н-ч;

$T_i$  – фактическая трудоёмкость  $i$ -ой операции, н-ч;

$k_{\text{пр}}$  – коэффициент производительности СТО;

$C_{\text{сек}}$  – показатель, отражающий конструктивно-технологические особенности секции;

$M_{\text{сек}}$  – масса секции (складывается из массы листов обшивки, массы набора главного и поперечного направлений, массы забойных и деталей насыщения), кг.

Массу секции в первом приближении можно определить по формуле:

$$M = l \cdot b \cdot s \cdot \gamma \cdot k_{\text{наб}}. \quad (4)$$

где  $l, b$  – длина и ширина секции, м;

$s$  – толщина обшивки секции, м;

$\gamma=7,85 \text{ т/м}^3$  – плотность стали;

$k_{\text{наб}}$  – коэффициент, учитывающий массу набора секции и зависящий от её типа:  $k_{\text{наб}}=1,3$  – для секций с преимущественно холостым набором,  $k_{\text{наб}}=2,0$  – для секций с преимущественно рамным набором, а также для объёмных секций.

$$T_i = \frac{T_i^{\text{СТО}}}{k_i^{\text{СТО}}}, \quad (5)$$

где  $T_i^{\text{СТО}}$  – фактическая трудоёмкость изготовления  $i$ -ой операции, н-ч.

При нормировании технологических процессов в судостроении рекомендуется разделять изготовление узлов и секций на отдельные операции. Их содержание определяется спецификой производственного процесса, организационной структурой и используемым оборудованием. Такой подход помогает выделить все организационные и технологические аспекты, воздействующие на трудоёмкость работ.

Структура затрат рабочего времени представлена на рисунке 2.

Следующим этапом является расчёт норм времени для каждой технологической операции.

Расчёт трудоёмкости изготовления типовой секции выполняется в соответствии с составом структуры нормируемого времени:

$$T_{\text{сек}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{пзи}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{опи}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{обси}} + T_{\text{отд}}^{\text{сек}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{сек}}$  – трудоёмкость изготовления типовой секции, н-ч;

$T_{\text{пзи}}$  – подготовительно-заключительное время на выполнение  $i$ -ой операции при изготовлении типовой секции, н-ч;

$T_{\text{опи}}$  – оперативное время  $i$ -ой операции при изготовлении типовой секции, н-ч;

$T_{\text{обси}}$  – время на обслуживание рабочего места, затраченное при выполнении  $i$ -ой операции изготовления типовой секции, н-ч;

$T_{\text{отд}}^{\text{сек}}$  – время на отдых и личные нужды, н-ч.

Величина трудоёмкости изготовления типовой секции  $T_{\text{сек}}$  относится к нормируемым затратам рабочего времени.

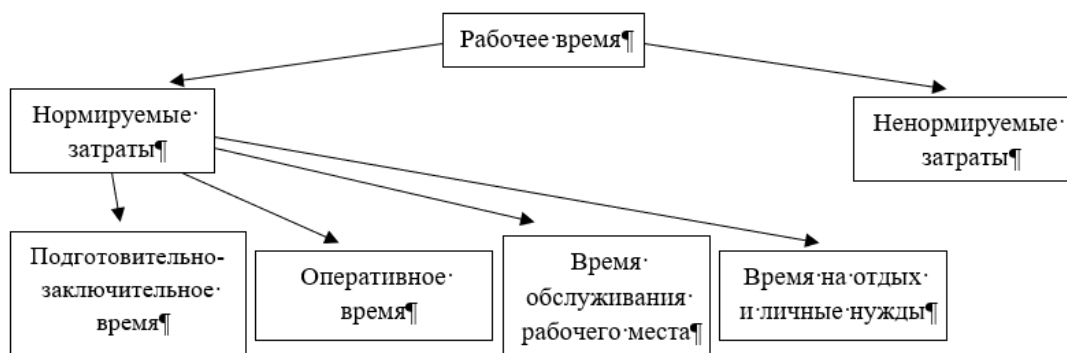


Рисунок 2 – Структура рабочего времени изготовления секций

Параметры эффективности (выходные параметры) процесса производства секций складываются под влиянием внешних факторов и заданных входных характеристик.

К внутренним факторам, определяющим работу производственной системы, относятся:

- 1) способы организации труда;
- 2) распределение значений удельной трудоёмкости, рассчитанной при нормировании в соответствии с этими организационными формами [4].

Итак, величины, описывающие внутреннее взаимодействие производственной системы:

- значения цикла выполнения  $i$ -ой операции:

$$C_i = \frac{T_i}{m_{op}}; \quad (7)$$

- цикла работы позиции:

$$C_i^{poz} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{m_{op}^{poz}}; \quad (8)$$

- ритма выпуска секций:

$$P = \max(C_i^{poz}). \quad (9)$$

Длительность цикла и ритм производства определяются следующими факторами:

- 1) количеством занятых рабочих;
- 2) числом рабочих позиций при поточной организации производства;
- 3) производительностью ступенно-сборочного оборудования при механизации наиболее трудоемких операций.

К **ключевым оптимизационным параметрам** относятся:

- 1) коэффициент загрузки рабочих позиций ( $k_{з.поз}$ );
- 2) производственный цикл изготовления серии типовых секций ( $C_{п.сек}$ );
- 3) коэффициент загрузки производственной системы ( $k_з$ ).

В данной статье анализируются показатели эффективности, используемые для сравнительной оценки различных ( $j$ -ых) вариантов модели производственной системы:

- 1) продолжительность производственного цикла изготовления серии секций:

$$C_{n сек}^j = P \cdot (N_{сек} + (П - 1) \cdot П), \quad (10)$$

где  $(П-1) \cdot П$  – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени в начале и в конце процесса изготовления комплекта секций;

$П$  – число позиций, при применении поточных форм организации производства;

$P = \max(C_i^{poz})$  – ритм работы позиций потока, ч;

$C_i^{poz}$  – производственный цикл работы  $i$ -ой позиции, ч.

Тогда:

$$C_{n сек}^j = f(C_i, P, П, M_{сек}, C_{сек}, m_{o.p}). \quad (11)$$



Данный параметр зависит от числа позиций, применяемой формы организации производства, численности производственных рабочих, массы секции и её конструктивных особенностей.

Следовательно, основными сравнительными зависимостями, отражающими гибкость систем при рассмотрении альтернативных вариантов, являются:  $\frac{C_{n \text{ сек}}}{M_{\text{сек}}}$  и  $\frac{C_{n \text{ сек}}}{m_{o.p}}$

2) коэффициент загрузки производственной системы:

$$k_3^j = \frac{N_{\text{сек}} \cdot C_{n \text{ сек}}}{\Phi} \quad (12)$$

то есть:

$$k_3^j = f(N_{\text{сек}}, \Phi, C_{n \text{ сек}}^j) \quad (13)$$

При этом:

$k_3 = 1$ , если секция будет произведена в соответствии с установленными ранее сроками.

$k_3 < 1$  свидетельствует о наличии существенного резерва для повышения эффективности производства. Это создает потенциальную возможность увеличения выпуска секций без изменения общего фонда рабочего времени.

Данный показатель определяется тремя ключевыми факторами:

- 1) плановым количеством секций
- 2) доступным фондом рабочего времени
- 3) длительностью производственного цикла изготовления серии секций.

Следовательно, основными зависимостями, отражающими гибкость системы, будут являться:  $\frac{k_3^j}{M_{\text{сек}}}, \frac{k_3^j}{m_{o.p}}$ .

3) коэффициент загрузки позиций:

$$k_{3.\text{поз}} = \frac{P \cdot \Pi - \sum_{i=1}^n C_i}{P \cdot \Pi} \cdot 100, \quad (14)$$

где  $\sum_{i=1}^n C_i$  – сумма циклов производственных операций без учёта синхронизации.

Данный коэффициент отражает соответствие принципам производственной логистики и способность системы минимизировать простои рабочих позиций, вызванные ожиданием перехода к следующим операциям.

Закон синхронизации производственных циклов позиций будет считаться выполненным при выполнении условия  $k_{3.\text{поз}} = (75 \dots 100)\%$ .

Кроме основных зависимостей, характеризующих гибкость производственной системы сборочно-сварочного производства при воздействии внешней среды, и входных параметров, необходимо отметить следующие зависимости:

$\frac{m_{o.p}}{M_{\text{сек}}}$  – позволяет оценить требуемое количество рабочих и учитывает массу секции и внешние факторы;

$\frac{C_{\text{сек}}}{M_{\text{сек}}}, \frac{C_{\text{сек}}}{m_{o.p}}, \frac{P}{M_{\text{сек}}}, \frac{P}{m_{o.p}}$  – дают возможность прогнозировать длительность производственного цикла и ритм производства, а также учитывают массу секции, численность рабочего персонала и внешние воздействия;

$\frac{N_{\text{сек}}}{M_{\text{сек}}}, \frac{P}{m_{o.p}}$  при  $k_3=1$  – позволяют оценить возможный объём выпуска секций и изменение ритма производства, анализируют влияние массы секции и количество производственных рабочих при условии  $t = P$ .

Каждое последующее полученное значение этих отношений отличается от предыдущего в сторону убывания или возрастания. Результаты этих зависимостей отображаются преимущественно в виде графических построений.

Таким образом, можно заключить, что внедрение гибких производственных систем в условиях сборочно-сварочных процессов отвечает всем требованиям современного



судостроительного производства. В настоящее время применение ГПС является ключевым фактором конкурентоспособности данной отрасли, позволяя сокращать сроки, снижать затраты и повышать качество изготавливаемой продукции. Внедрение гибкой производственной системы требует комплексной цифровизации и автоматизации оборудования, но окупается за счёт высокой адаптивности к изменениям как в производственных процессах, так и на рынке.

#### **Список литературы:**

1. ОСК | Северная верфь Основные этапы постройки кораблей и судов / ОСК | Северная верфь [Электронный ресурс] // Дзен : [сайт]. — URL: <https://dzen.ru/a/Zo5BI0wgxXx2PQYx> (дата обращения: 15.04.2025).
2. Исанин Н.Н. ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС / Исанин Н.Н. [Электронный ресурс] // Академик : [сайт]. — URL: [https://sea\\_enc\\_reference.academic.ru/182/ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС](https://sea_enc_reference.academic.ru/182/ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС) (дата обращения: 15.04.2025).
3. Галочкин, Дмитрий Александрович Разработка метода имитационного моделирования потоковых процессов сборочно-сварочного производства в судостроении : специальность 05.08.04 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства» : Диссертация на соискание кандидата технических наук / Галочкин, Дмитрий Александрович ; ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова». — Санкт-Петербург, 2013. — 165 с.
4. Галочкин, Д. А., Огнев, Н. В., Бурмистров, Е. Г. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОТОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ВЕРФИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЗАКОНОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ [Текст] / Д. А. Галочкин, Н. В. Огнев, Е. Г. Бурмистров // СУДОСТРОЕНИЕ. — 2013. — № 2. — С. 49-53.

