

УДК 658.512.2:658.512.3: (045)

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДОВ ДОЛГОСРОЧНОГО И СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОСТРОЙКИ ЗАКАЗОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ВЫТЯГИВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

В.И. Куперштейн (Санкт-Петербург)

Введение

Для многих аспектов деятельности верфи важны обоснованные показатели заключаемых контрактов и долгосрочные планы предприятия.

На практике для долгосрочного и даже для среднесрочного планирования применяют достаточно простые модели и методы. Часто для этой цели используют методы объёмно-календарного планирования, определяя распределение объёмов работ участников работ по календарным интервалам для всех компонентов портфеля заказов верфи.

Основная проблема, связанная с его применением, заключается в обоснованности распределения показателей объёмов работ по календарным интервалам, которая на практике часто обеспечивается опытом и интуицией плановиков. Такое распределение часто выполняют на основании данных прототипов, не имея возможности проверить соответствие условий постройки прототипа и расчётного судна. Это может привести к необходимости часто корректировать планы по мере того, как становится ясной невозможность их выполнения или выполнять неактуальные плановые показатели формально, в том числе и за счёт нарушения технологических процессов (например, за счёт преждевременного начала выполнения работ, не полностью готовых к запуску).

Не подвергая сомнению значимость опыта плановиков, можно предположить, что использование научно обоснованных методов проектирования производственных процессов постройки судов в дополнение ко всем применяемым на практике может оказать существенную пользу при разработке долгосрочных и среднесрочных планов.

Перспективным представляется зарубежный и отечественный опыт использования для этих целей методов имитационного моделирования. Например, из иностранных работ можно отметить статью [1], а из отечественного опыта следует упомянуть о системе «Сириус» [2]. Значительная часть публикаций в этой области ограничиваются частными задачами (например, статьи [3], [4]). Но следует отметить, что методы имитационного моделирования достаточно сложны и часто оказываются слишком громоздкими для целей долгосрочного и даже среднесрочного планирования. Работа с ними требует очень высокой квалификации плановиков как в области управления судостроительным производством, так и в области методов имитационного моделирования.

Постановка и метод решения задачи

Изложенное позволяет считать актуальным качественное совершенствование хорошо освоенных в отечественной практике методов объёмно-календарного планирования для моделирования судостроительного производства. Некоторые материалы, важные для реализации этой возможности, проанализированы в монографии [5]. В этой работе предложено использовать для этой цели метод системной динамики, разработанный в 50-х годах прошлого века. Основные положения этого метода изложены, например, в книге [6].

В соответствии с этой моделью для некоторой производственной единицы (ячейки) можно связать количественные показатели входа и выхода с помощью линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\dot{y}(t) = b \cdot (f(t) - y(t)), \quad (1)$$

где $y(t)$ - интенсивность выхода ячейки в момент времени t ;
 b - коэффициент приращения ценности, формируемой в данной ячейке;
 $f(t)$ - интенсивность входа ячейки в момент времени t .

Для такой модели вход ячейки $f(t)$ можно интерпретировать как оценку интенсивности запуска, а выход ячейки $y(t)$ – как оценку интенсивности выпуска.

Методы решения линейных дифференциальных уравнений хорошо разработаны, и это позволяет анализировать реакцию модели на разные виды запуска.

В работе [5] показано, что для целостного моделирования процессов постройки судов в дополнение к математической модели работы ячейки необходимо сформировать:

- состав ячеек производства конкретной верфи с учётом её организации и специализации цехов и участков;
- детализированные модели конкретных производственных ячеек с тем, чтобы можно было учитывать их специфику;
- состав внешних ресурсов (РКД и материалов), необходимых каждой из ячеек для выполнения характерных для неё работ;
- модели технологических цепочек, сложившихся на верфи как связи между ячейками производства, складывающиеся на основе применяемых конкретной верфью типовых технологических процессов;
- параметры организационно-технологических решений, определяемых на основании принципиальной технологии постройки каждого из заказов;
- модели потоков внешних ресурсов, без которых производство не может работать (прежде всего это РКД, материалы и изделия собственного изготовления).

Многие из перечисленных выше вопросов рассмотрены в работе [5], в которой получено решение для отклика ячейки на запуск постоянной интенсивности, действующий в течение определённого периода времени $\{0, T\}$. Такая модель позволяет количественно оценивать показатели выпуска в зависимости от объёма входа ячейки производства. Решение уравнения (1) для этого случая может быть получено в виде

$$\begin{aligned} y(t) &= P \cdot k \cdot e^{-\alpha t} && \text{при } t < T; \\ y(t) &= y(T) \cdot e^{-\alpha(t-T)} && \text{при } T < t < t_0; \\ y(t) &= y(T) \cdot e^{-\alpha(t-T)} && \text{при } t_0 < t < t_0 + d, \end{aligned} \quad (2)$$

где T – период действия запуска;
 P – интенсивность запуска;
 k – коэффициент, учитывающий приращение ценности в ячейке (отношение стоимости выпуска к стоимости запуска);
 t_0 – средний период времени, в течение которого ячейка выполняет типовое задание в основном;
 d – средний период времени, в течение которого ячейка выполняет сдачу типового задания;
 z – доля объёма работ по выполнению типового задания в основном (то есть без учёта затрат труда на сдачу задания);
 α – коэффициент, который может быть вычислен на основании численного решения следующего равенства:

$$\frac{P \cdot k \cdot (1-z) - S y(T)}{y(T)} = \frac{1 - e^{-\alpha(t_0-T)}}{\alpha} \quad (3)$$

Пример такого решения показан на рис. 1.

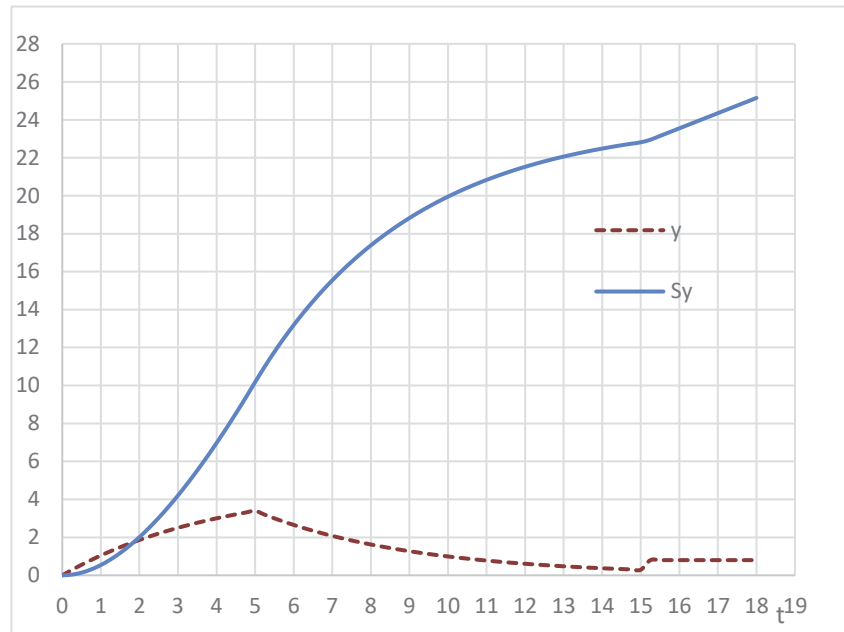


Рис. 1. Пример отклика модели на импульс входа и на вход постоянной интенсивности

С учётом возможностей современной вычислительной техники для моделирования работы ячейки на основании предложенной модели следует использовать цифровую схему. Основой такой схемы является разбивка времени на равные интервалы длительностью Δ . Величина такого интервала должна быть выбрана исходя из того, что в рамках этого интервала с достаточной для целей долгосрочного и среднесрочного планирования точностью можно считать:

- интенсивность работ каждой из ячеек постоянной (или что она может сводиться к постоянной мерами оперативного регулирования работ);
- округление планируемых сроков работ и даже ключевых событий в пределах интервала Δ не должно заметно искажать планы.

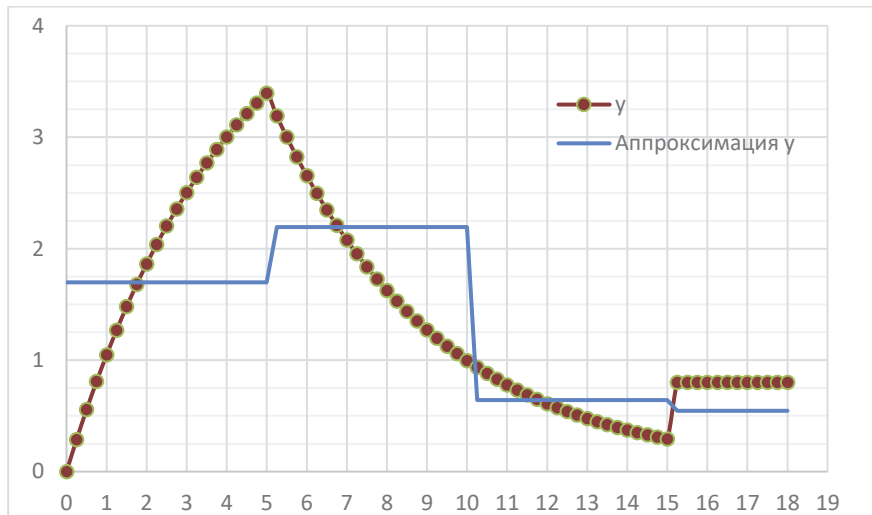
Есть основания считать, что в качестве такого интервала в имеющихся практическое значение задачах может быть использована неделя.

Следовательно, в рамках такого предположения в формулах (2) необходимо выполнить следующую замену

$$T = \Delta \quad . \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с таким представлением решение может быть заменено ступенчатой функцией v , каждый шаг которой по времени численно равен Δ (на практике, как уже указывалось выше, этот показатель будет равен одной неделе). С учётом предложенного представления можно рассматривать ступенчатую функцию v в качестве модели отклика (реакции) ячейки на поступление в неё в течение времени Δ входа (запуска), объём которого равен 1. Количество шагов (ступеней) такой функции n будет определяться соотношением показателей Δ , t_0 и d .

Пример такой аппроксимации отклика ячейки на запуск, поступивший в неё по рассматриваемой модели, представлен на рис. 2.

Рис. 2. Пример аппроксимации функции $y(t)$ ступенчатой функцией

Количество интервалов времени Δ , характерных для отклика ячейки, можно вычислить в соответствии с формулой

$$n = \text{int}\left(\frac{t_0 + d}{\Delta}\right), \quad (5)$$

где $\text{int}(x)$ – функция, численно равная наименьшему из целых чисел, которое не меньше значения x .

С учётом такого предположения отклик (реакция) выпуска ячейки на поступление в неё в течение интервала времени Δ запуска объёмом P может быть вычислен приближённо с помощью формулы

$$y_{k+m} = P_k \cdot v_{k+m}, \quad (6)$$

где k – индекс шага по времени, длительность которого равна Δ ;

P_k – оценка объёма запуска ячейки на шаге k ;

m – индекс шага по времени, отсчитываемый от шага k ;

v_k – табличное представление функции отклика ячейки.

Интервал времени, на котором выполняется моделирование работы ячейки, может быть разбит на большое количество шагов длительностью Δ единиц времени и при необходимости начало и конец каждого шага можно связать с календарными датами.

С учётом последействия (то есть влияния запуска в интервале m на последующие интервалы) можно в общем случае для расчётной оценки объёма выпуска uw в интервале m использовать следующее выражение

$$uw_m = \sum_{j=1}^n P_{m-j} \cdot v_{n-j+1} \text{ при } n-j > 0 \text{ и } j < m \quad (7)$$

Выражение (7) обеспечивает возможность численного решения задачи планирования выталкивающего производства на основе известных значений запуска P_k .

Такая постановка задачи ориентирована на производство выталкивающего типа. Для производств такого типа неизбежен значительный объём заделов (и соответственно незавершённого производства), обоснование которых часто бывает неясным. В современных условиях считается перспективным использовать модель вытягивающего производства, которая обеспечивает возможность заметного снижения объёма заделов при росте эффективности производства. Его основы изложены, например, в книге [7].

Но если рассматривать задачу планирования вытягивающего производства, то для её строго корректного решения необходимо интегрировать выражение (1) по времени. Можно показать, что это приводит к интегральным уравнениям Вольтерра второго вида с ядром, равным единице. Аналитическое решение уравнений такого вида получить в общем случае крайне сложно, и для решения таких уравнений на практике используют приближённые методы.

Учитывая рассмотренную выше цифровую модель, можно считать, что для каждого интервала времени требуемый объём выпуска задан таблицей F_m . Сравнивая заданный выпуск F_m с результатами вычислений по формуле (7), задачу планирования вытягивающего производства можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такой набор значений P_m , который доставляет минимум критерию близости значений F_m и y_m .

Такой критерий W может быть записан в следующей форме:

$$W = \sum_{m=1}^K (F_m - y_m)^2, \quad (8)$$

где K – количество интервалов времени периода моделирования.

При поиске минимума значения критерия (8) необходимо ограничить искомые значения P_m неотрицательными значениями, допуская, что для каждой ячейки может существовать ограничение по объёму запуска, который может быть освоен в течение интервала времени Δ . Эти ограничения можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_m &\geq 0; \\ y_m &\leq S_m, \text{ где } S_m \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В последнем выражении значение S_m представляет собой оценку максимально возможного для ячейки уровня выработки.

Одновременно с ограничениями (9) искомое решение должно учитывать возможные ограничения на взаимосвязь работ предшествующей и последующей ячеек, основные из которых рассмотрены в работе [5]. Такие ограничения могут иметь одну из трёх форм, рассмотренных ниже.

Первое из таких ограничений может требовать, чтобы выпуск рассматриваемой ячейки отставал от запуска на заданное количество единиц времени t_1 или, что то же самое, на δ шагов по времени. С учётом этого выражение (7) следует переписать в следующем виде:

$$y_m = \sum_{j=1}^n y_{m-j-\delta} \cdot v_{n-j+1} \quad (10)$$

при $n-j > 0$ и $j < m-\delta$

Второй тип ограничения может требовать, чтобы к моменту начала выпуска рассматриваемой ячейки накопленный объём запуска составлял бы не менее наперёд заданной величины

$$\sum_{j=1}^{km} y_j \geq V \cdot r, \quad (11)$$

Где km – номер первого из интервалов времени, в котором объём выпуска ячейки k , определяемый выражением (10), окажется больше нуля;

r – фактор ограничения рассматриваемого вида для ячейки,
причём $0 \leq r_k \leq 1$;

V – планируемый полный объём запуска рассматриваемой ячейки.

Третий тип ограничения может допускать, что накопленный объём выпуска ячейки y_m при нулевом значении запуска не должен нарушать следующее ограничение

$$\sum_{j=1}^m y_j \leq V \cdot k \cdot p, \quad (12)$$

Где p – фактор ограничения рассматриваемого вида для ячейки, причём $0 \leq p_k \leq 1$.

Очевидно, что ограничения второго и третьего типа не могут быть применены одновременно.

Таким образом, моделирование и планирование вытягивающего производства даже в рамках принятых упрощающих предположений связано с необходимостью решения нелинейной задачи оптимизации, которая заключается в определении такого набора значений P_m , который доставляет минимум критерию оптимальности в форме (8) с учётом ограничений (9), (10), (11) или (12).

Метод решения задачи

Учитывая, что для реальных производственных систем характерны десятки ячеек, связанные между собой сложными технологическими потоками, для решения сформулированной задачи необходимо специализированное программное обеспечение, реализующее метод динамического программирования, основы которого разработаны достаточно давно (см., например, [8] или [9]). Это позволило разработать достаточно простое программное обеспечение, позволяющее отработать возможность решения задач моделирования вытягивающего производства и выявить проблемы, которые требуют дополнительных работ и исследований.

Значительно упрощённая схема алгоритма решения задачи с использованием метода динамического программирования приведена на рис. 3.

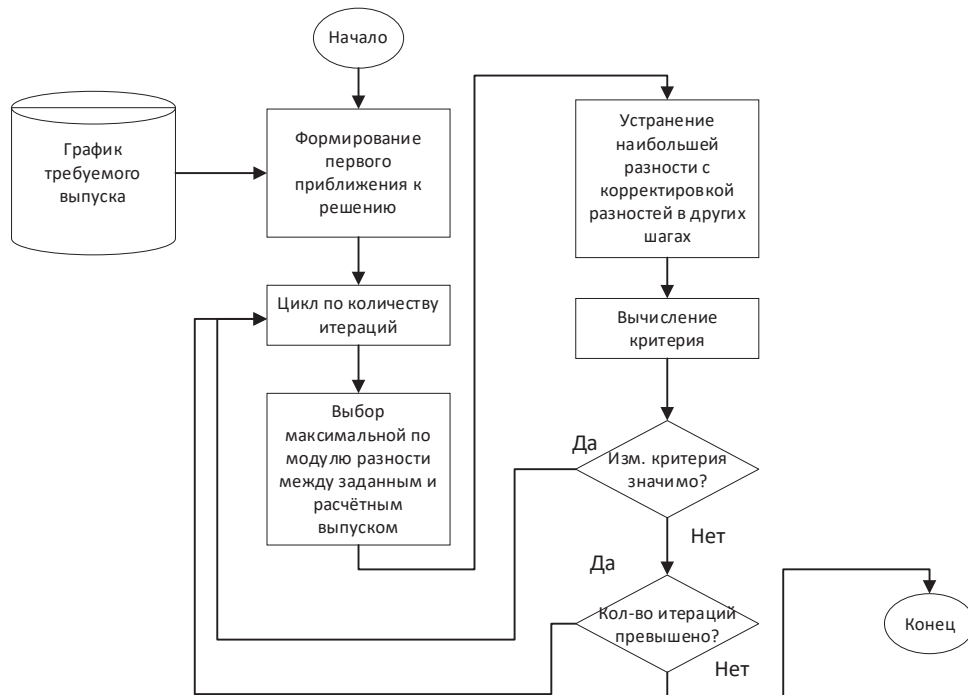


Рис. 3. Упрощённая схема алгоритма модели ячейки в условиях вытягивающего производства

Эксперименты показали, что предложенный алгоритм обеспечивает решение задач в приемлемое время. Затраты процессорного времени при росте количества данных в оптимизируемой таблице и даже количества итераций росли медленно. Например, в серии примеров количество данных в оптимизируемых таблицах изменялось от 15 до 50 пар значений функций P и u , и при количестве итераций от 50 до 100 затраты процессорного времени на решение одной задачи имели порядок 60-90 миллисекунд (то есть до одной десятой секунды).

Оценить точность получаемых решений оказалось возможным сравнивая заданные значения выпуска u с вычисленными по формулам (10) значениями выпуска, полученными в рассмотренных контрольных примерах. На этой основе оказалось

возможным качественно оценить влияние характера заданной функции выпуска на точность решения. Сходимость вычисленных значений выпуска к заданным определялось для разных видов функции заданного выпуска. При этом вид функций заданного выпуска варьировался от прямоугольного до близкого к синусоиде при одинаковых объёмах запуска и выпуска во всех случаях. Примеры вида диаграмм с результатами моделирования для нескольких из рассмотренных примеров приведён на рис. 4.

На рис. 4 для каждого из рассмотренных примеров показаны:

- заданная функций выпуска y ;
- расчётные значения функции запуска P ;
- расчётные значения выпуска, соответствующие расчётным значениям запуска y_w .

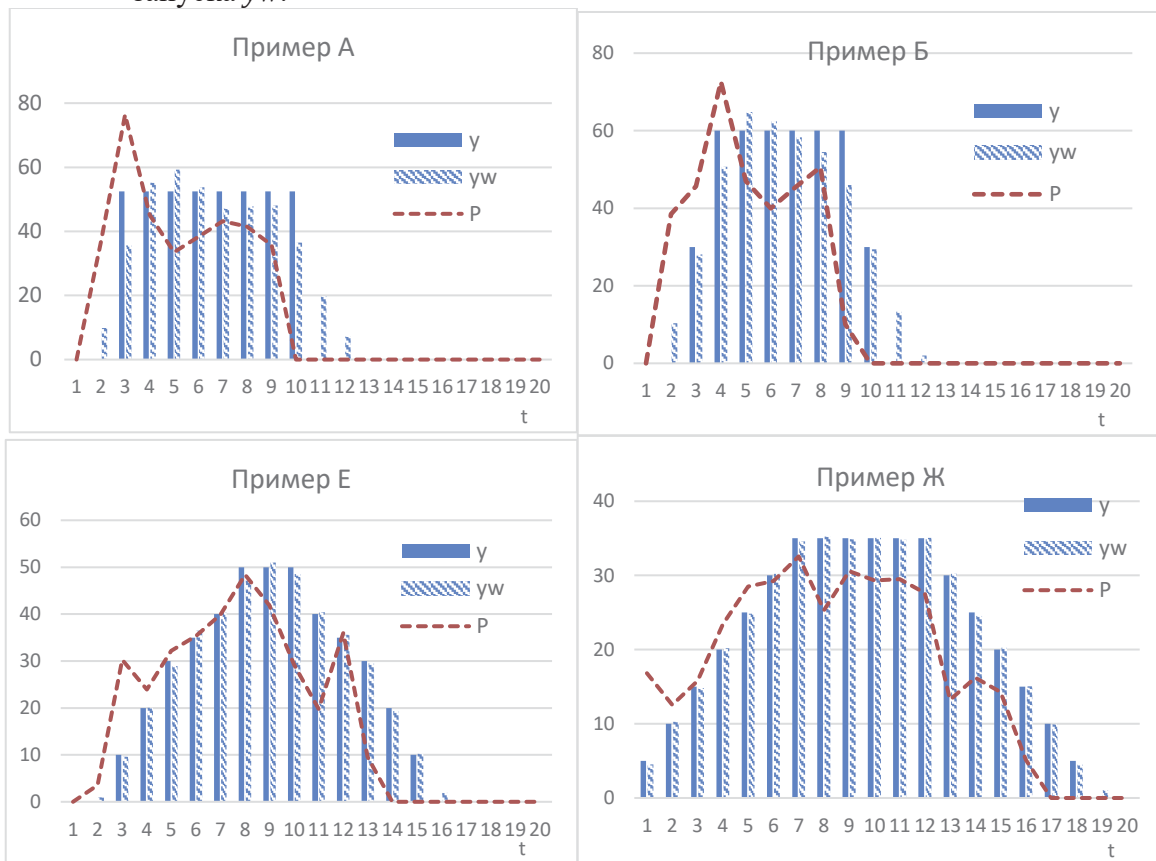


Рис. 4. Примеры диаграмм для рассмотренных примеров для разных видов функций заданного выпуска y

Из приведённых данных видно, что погрешность вычисления функции запуска по отношению к заданному выпуску существенно снижается по мере использования более гладких функций, определяющих требуемый выпуск y . Анализ показал, что применительно к рассматриваемому случаю разностного представления функций мерой гладкости представленных таким образом функций может служить модуль максимального отношения разности между соседними значениями заданной функции выпуска к максимальному значению этой функции:

$$G = \frac{\max_i \{ \text{abs}(y_i - y_{w_i}) \}}{\max_i \{ y_i \}}, \quad (13)$$

где G – мера гладкости функций, представленных табличными значениями (G может изменяться от 0 до 1).

На рис. 5 показано влияние гладкости заданных функций выпуска на относительную среднеквадратичную точность результатов моделирования.

Анализ показанной на рис. 5 диаграммы и построенных линий тренда позволяет примерно оценивать точность моделирования. Проанализированные примеры позволили получить формулы, позволяющие приближённо оценивать достижимую погрешность предлагаемого метода:

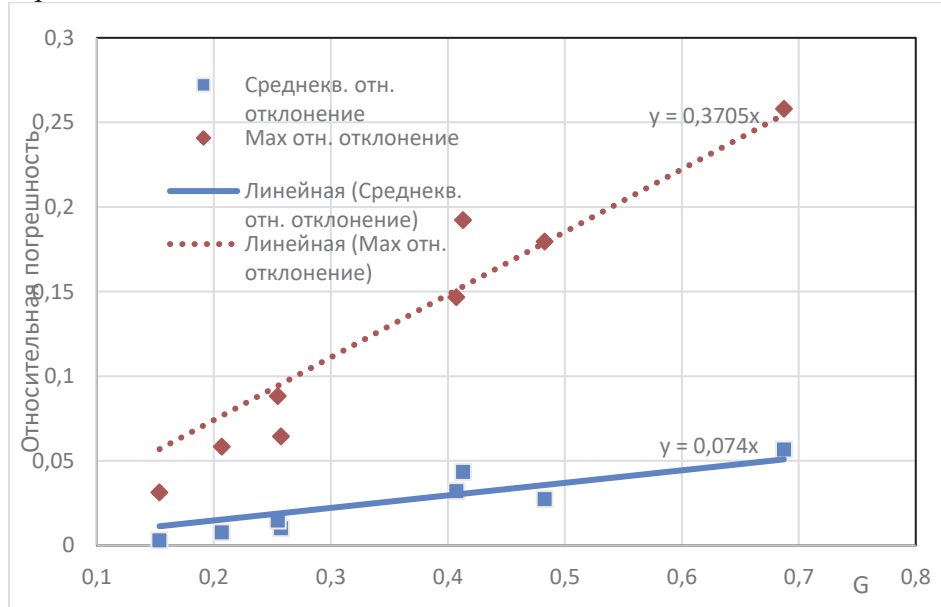


Рис. 5. Диаграмма влияния гладкости функций выпуска на относительную точность моделирования

относительное значение среднеквадратичного отклонения δ

$$\delta = 0,074 \cdot G; \quad (14)$$

максимальное относительное отклонение δ_m .

$$\delta_m = 0,37 \cdot G. \quad (15)$$

Априорно задаваясь допустимой степенью точности модели (с учётом характера долгосрочного планирования), можно с использованием формул (14) и (15) определять требования к значению фактора G . Использование этого значения позволит обоснованно разрабатывать форму функций, описывающих требуемый выпуск ячеек. Так, например, достижение среднеквадратичной точности порядка 2% требует, чтобы мера гладкости задаваемых функций выпуска G была бы менее 0,25. Максимальные относительные отклонения при этом могут иметь порядок 6-7%. Но при этом следует учитывать, что применительно к долгосрочному планированию показатели относятся обычно к крупным комплексам работ, для которых как раз характерна достаточно плавное нарастание и спад.

Выводы

Анализ использования этого программного обеспечения позволил сделать ряд выводов.

1. Метод динамического программирования может быть использован для моделирования и долгосрочного планирования производств единичного типа (в том числе и постройки судов).

2. Цифровая модель в сочетании с методом динамического программирования позволяет применительно к рассматриваемой задаче находить не только первые локальные минимумы критерия вида (8). Об этом можно судить на примере анализа изменения значений критериев, приближённых к реальным данным контрольных

примеров, показанных на рис. 6. На этом рисунке показаны изменения значений критериев в последовательных итерациях.

Из приведённого на рис. 6 примера видно, что предложенный подход обеспечивает существенное улучшение условно допустимого первого приближения к искомому решению, которое может быть построено эмпирическими методами.

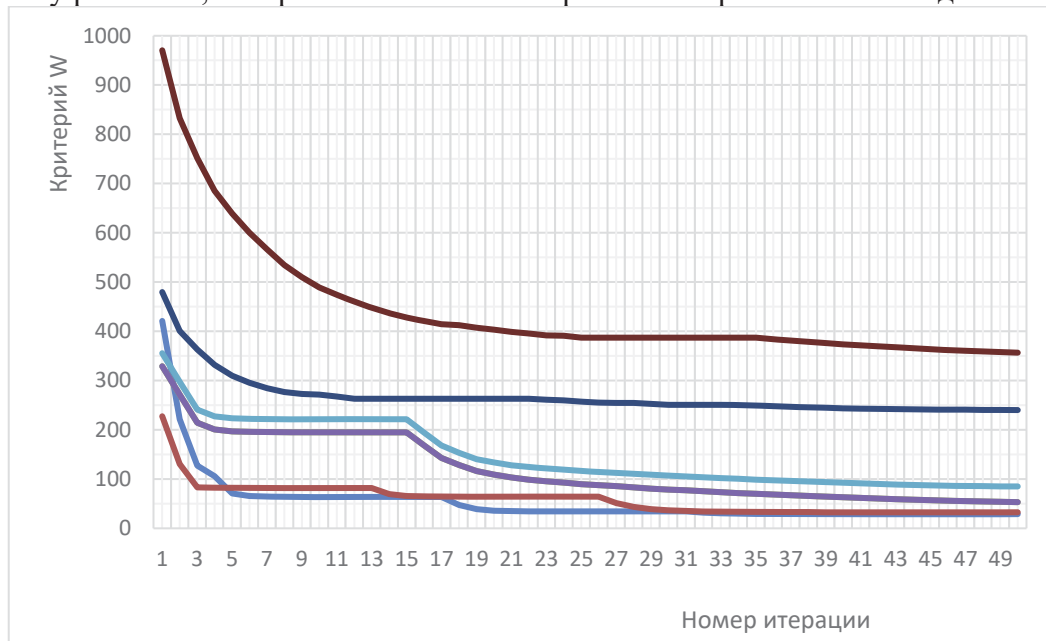


Рис. 6. Пример изменения значения критериев сходимости в процессе оптимизации

3. Выполненный анализ показал, что для относительно гладких функций, которые характерны для укрупнённого планирования работ, предложенный метод обеспечивает приемлемую точность определения плановых показателей долгосрочных планов.

4. В целом предложенный метод цифрового моделирования может быть использован для моделирования (долгосрочного и среднесрочного планирования) постройки судов в условиях не только выталкивающего, но и вытягивающего производства.

Благодарности

В целом работа носила инициативный характер.

Автор выражает глубокую признательность д.т.н. А.Е. Богданову за интерес к работе, поддержку и затраченное время, которые позволили ему дать целый ряд ценных для автора советов и высказать обоснованную критику.

Литература

1. **Chong Wang, Yun-sheng Mao, Zu-quan Xiang, Yong-qing Zhou.** Ship Block Logistics Simulation Based on Discrete Event Simulation.
2. Автоматизированная система «Сириус» [Электронный ресурс] // Центр технологии судостроения и судоремонта. URL: <https://www.sstc.spb.ru/product/kompyuternoe-modelirovanie-i-razrabotka-programmnogo-obespecheniya/avtomatizirovannaya-sistema-sirius/>.
3. **D.H. Kwak и др.** Optimization of Flat Block Assembly Line Using Constraint Programming and Discrete-Event Simulation. 2023.
4. **Yui Okubo, Taiga Mitsuyuki.** Ship Production Planning Using Shipbuilding System Modeling and Discrete Time Process Simulation.
5. **Куперштейн В.И.** Анализ узких мест производств. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

6. **Форрестер, Д.** Мировая динамика. М.: АСТ, 2004.
7. **Вумек Джеймс, Джонс Дэниел.** Бережливое производство : как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. Альпина Пабlishер, 2010.
8. **Беллман Р.** Динамическое программирование. М.: Наука, 1960.
9. **Беллман Р., Калаба Р.** Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969.