

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМНЫХ ПОДХОДАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЙКИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

Г. Я. Кремлёв, *вед. инженер-конструктор ПАО «СЗ «Северная верфь»*,
Д. И. Гомонов, *начальник бюро подготовки производства
ОГТ АО «Кронштадтский морской завод»*,
контакт. тел. +7 (911) 199 4708, +7 (911) 128 2668

При постройке крупных объектов, где заняты тысячи человек, зачастую используют методы типового технологического проектирования с учетом размера, количества операций и однотипности процессов в локальном представлении. В процессе цифровизации можно вернуться к формированию операционного технологического процесса, что позволит интегрировать знания специалистов в систему знаний предприятия, а на основе личного опыта определять специфику с учетом особенностей производственных цепочек конкретного предприятия.

Центральными методами, используемыми при цифровой трансформации, будут аналогия и преобразование систем управления в модели, а модели – в их математические аналоги, последние будут решены однозначно, но первый подход позволит прийти до принимаемой невязки. Попробуем определить порядок ее определения и величину.

Основополагающим постулатом – базисом анализа и управления методами теории управления механических систем (в некоторых изданиях – теории автоматического управления) – является степень точности цифровой модели – цифровизации объектов управления. Но подобный подход приводит к расходящемуся ряду решений, что в общей структуре будет представлять неопределенную систему уравнений, где их количество больше количества определяющих уравнений. В классической теории механики применяется метод расчета необходимой и достаточной точности.

Определим порядок системы, точнее, в общем случае примем систему с шестью степенями свободы (три поступательных, три вращательных – A, R). Ввиду значимости временной составляющей будем рассматривать динамическую систему t . Определимся с требуемым периодом дискретизации процессов, которая, как в классической механике, будет проводиться по параметру времени, для судостроения – по минимальному времени управления, или суточным заданиям.

Таким образом, в общем случае инвариант примет вид

$$J = \{A_1, A_2, \dots, A_n; L_1, L_2, \dots, L_m, R_1, R_2, \dots, R_m\}, \quad (1)$$

где A_i – параметры дискретизации согласно представлению выше, L_i – маршрут технологической оперативной связи, R_i – ограничение маршрута с учетом размещения моделей заказа [4].

Сам процесс формирования технологии постройки представляет собой «разборку» модели проектанта в условиях вариации инварианта (1), тем самым формируется базовая технология постройки, при этом ее изменения представляют собой либо технологические варианты либо изменения, согласованные с проектантом [5].

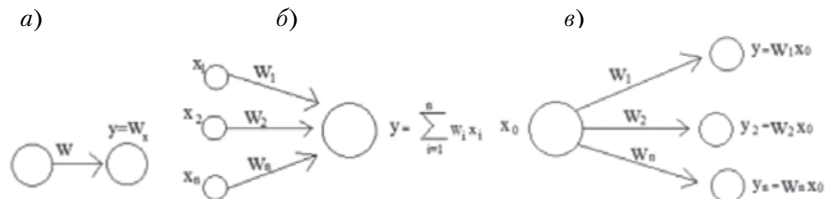


Рис. 1. Граф: а – одноответвой, б – многоответвой, в – многоветвейвой

Представим процесс формирования технологии и постройку через граф системы управления дугами, где вершина – переменная, а ребро – связь между вершинами. Вершина на схеме изображается кружком и определяет переменную. Если к вершине подходит одно ребро, то она характеризует выходную величину ребра (рис. 1, а), если же в вершину входят несколько ребер, то она соответствует сумме выходных переменных этих ребер (рис. 1, б). Начальная вершина ребра определяет ее входную переменную (исходные данные) (рис. 1, в), вершина графа, имеющая только выходящие из нее ребра, – внешнее воздействие и называется входной вершиной графа.

Таким образом, последовательность ребер $W_1, W_2, \dots, W_n$ – ориентированный маршрут, определяющий путь от x_0 до x_n . При этом, если не возникает технологического дублирования (все вершины различны), то следует рассматривать путь от x_0 до x_n как простой. Это означает условное ограничение подбора технологического пути постройки как простого пути от x_0 до x_n при автоматическом построении путь становится сложным как вариант проекта на основе ошибок проектанта (шифр 7) или внесения изменений в случае модернизации по требованию заказчика (шифр 9). Для отображения классического представления графа (рис. 2) управления в структурной схеме необходимо

сумматор с выходной переменной x заменить вершиной x , звено с передаточной функцией W – дугой W ; если выходная переменная подается на сумматор по отрицательному входу, то указанное звено следует заменить дугой W ; каждой переменной, в том числе соответствующей внешнему воздействию, присвоить свою вершину.

Здесь $x_{\text{вх}}$ – входящий сигнал (задающий), $x_{\text{вых}}$ – сигнал датчика выхода – управление (методом отрицательной обратной связи) на датчике выхода, μ – управление (методом отрицательной обратной связи), λ_1 – воздействие входное, λ_2 – воздействию системы (факторное), λ_3 – воздействие на прием управляющего сигнала.

При этом определителем графа A станет функция

$$A = 1 - \sum_j W_{0j} + \sum_{j,k} W_{0j} W_{0k} - \sum_{j,k,l} W_{0j} W_{0k} W_{0l} \dots \quad (2)$$

Здесь в первой сумме W_{0j} – передаточная функция j -го простого контура, равная произведению передаточных функций дуг, входящих в этот контур, и суммирование производится по всем простым контурам; во второй сумме $W_{0j} W_{0k}$ – произведение передаточных функций j -го и k -го простых контуров, и суммирование производится по всем непересекающимся парам контуров; в третьей сумме $W_{0j} W_{0k} W_{0l}$ – произведение передаточных функций



Рис. 2. Классическое системное представление управления

j -го, k -го, l -го простых контуров, и суммирование производится по всем несоприкасающимся тройкам контуров и т. д. Передаточная функция системы управления относительно входа x и выхода z определяется следующим образом:

$$W_{zx} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m W_{ni} A_i, \quad (3)$$

где A – определитель графа системы управления; W_{ni} – передаточная функция i -го прямого пути от начальной вершины x и конечной вершины z ; m – общее число таких прямых; A_i – определитель подграфа i -го прямого пути.

Выполним оценку устойчивости через ее алгебраический критерий; как известно, основным условием устойчивости непрерывной системы управления необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения имели отрицательную вещественную часть. На комплексной плоскости корни, имеющие отрицательную вещественную часть, располагаются в левой полуплоскости и поэтому называются левыми, корни, имеющие положительную вещественную часть, располагаются в правой полуплоскости и называются правыми, а корни, расположенные на мнимой оси – нейтральными. Поэтому основное условие устойчивости можно сформулировать еще так: для того чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения были левыми – необходимое условие устойчивости. Для того чтобы система была устойчива, необходимо, чтобы все коэффициенты ее характеристического уравнения

$$a_0 * \lambda^n + a_1 * \lambda^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (4)$$

были строго одного знака:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, \dots, a_n > 0$$

$$\text{или } a_0 < 0, a_1 < 0, \dots, a_n < 0.$$

Характеристический полином $Q(\lambda)$ (левая часть характеристического уравнения $Q(\lambda) = 0$) получается из собственного оператора $Q(p)$ простой заменой оператора p на комплексную переменную. Если дано уравнение системы управления в символической форме, то дифференциальный оператор при выходной переменной и будет собственным оператором. Другими словами, для определения устойчивости годятся классические критерии ее определения, а именно критерии Гурвица, Льерна–Шипара, а для частотной постановки задачи устойчивости подходит критерий Найквиста.

Таким образом, следует отметить, что и подграфы (операции в структуре формируемого техпроцесса) будут строго удовлетворять условиям, как часть целого, другими словами, классические критерии устойчивости применимы и для операций. Так, например, для формирования условного управления при операционной задаче будут применимы проверки устойчивости, что, в свою очередь, будет верно и для управляющего процесса в структуре

полного техпроцесса, что обуславливает для задач логистики подбор приоритета размещения, формирования, определения структуры развернутого фронта (в условиях определенного, но открытого агента).

Предлагаемый метод инверсионного формирования техпроцесса по модели проектанта способен обеспечить устойчивое выполнение условий, благодаря качеству этой модели, а в условиях безбумажного проектирования гарантирует надежное выполнение требований проектанта при минимизации издержек. При этом к системе применимы методы классической теории управления динамических систем, что обуславливает возможность системной инженерно-технологической подготовки при рассмотрении задач формирования техпроцесса постройки по модели проектанта. Качество формирования этого процесса будет напрямую зависеть от качества модели ее точности и полноты, что, в свою очередь, сводит систему инженерного-технологической проработки возможности изготовления к проверке модели – прогону через систему предприятия и выдаче пула пересечений, графа узлов типовых и требуемых операций, где остается лишь определиться с необходимостью применения не включенных в типовые (свойственные для строителя) операции на проектируемом заказе.

Следует отметить, что при использовании метода имитационного моделирования в условиях комплексной постановки технологического процесса по модели проектанта будут обеспечены не только удобство, единство формирования техпроцесса, прозрачность (поскольку система представляется открытой для внутренних служб), но и увеличение горизонта планирования за счет перехода от разового проектирования к системному, при этом знания специалиста будут становиться знаниями предприятия, а решения процесса постройки отражены в его информационной базе. Это позволит выделить технологические маршруты и приоритеты для дальнейшего развития предприятия строителя.

ВЫВОДЫ

1. Специфика применимости методов теории управления к системам имитационного моделирования технологии управления постройки сводится к классическим системам управления.
2. Применение методов теории управления механических систем позволит перейти от проектирования локального *Ad hoc* к системному.
3. Применение системы имитационного моделирования позволит базе данных предприятия наследовать знания специалистов и распространять их на предприятие.
4. Имитационное моделирование в рамках теории управления имеет вы-

сокую степень адаптивности и пригодно для анализа устойчивости управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихтциндер Б. Я., Ольберг П. А. Моделирование и цифровые двойники // Вестник Самарского ГТУ. – Сер.: Технические науки. – 2022. – № 4 (76). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-tsifrovye-dvoyniki> (дата обращения: 04.06.2024).
2. Привалов А. Н., Шаров В. А. Цифровое моделирование отказоустойчивых информационно-управляющих систем // Изв. ТулГУ «Технические науки». – 2023. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoye-modelirovanie-otkazoustoychivyyh-informatsionno-upravlyayuschih-sistem> (дата обращения: 04.06.2024).
3. Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж., Гринченко Л. А., Пушкова Д. А. Создание цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства // Изв. НВ АУК. – 2023. – № 2 (70). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-tsifrovoy-modeli-protsesta-komplektatsii-i-sborki-dlya-remontnogo-proizvodstva> (дата обращения: 04.06.2024).
4. Кремлёв Г. Я., Фомищев А. Б. Оптимизация формирования постройки корпусов судов и кораблей: практика и перспективные решения // Сб. НТС. – 2023. – С. 69–74.
5. Сальников Н. М., Кремлёв Г. Я., Фомищев А. Б. Применение имитационного моделирования при сборке и организации строительства объектов Минобороны // Известия РАН. – 2024. – № 4 (134). – С. 3–7.
6. Усачев М. С., Дорошенко В. А. Выбор операторных уравнений и структуры процессорных измерительных средств для автоматизации сборки изделий в приборостроении // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 4 (104). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-operatornyh-uravneniy-i-struktury-protsestsoykh-izmeritelnyh-sredstv-dlya-avtomatizatsii-sborki-izdeliy-v-priborostroenii> (дата обращения: 04.06.2024).
7. Бутко А. О., Кузнецов П. М., Хорошко Л. Л. Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // ГИАБ. – 2020. – № 8. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-tsifrovogo-dvoynika-protsestsoy-vosstanovleniya-drobilnoizmelchitel'nogo-oborudovaniya> (дата обращения: 04.06.2024).
8. Лаврентьева М. В., Говорков А. С., Карлина Ю. И. Сокращение сроков конструкторско-технологической подготовки высокоточного производства с использованием экспертной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sokraschenie-srokov-konstruktorsko-tehnologicheskoy-podgotovki-vysokotochnogo-proizvodstva-s-ispolzovaniem-ekspertnoy-sistemy> (дата обращения: 04.06.2024).
9. Муромский В. Р., Тынченко С. В. Применение технологии дополненной реальности в ракетостроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – №. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-dopolnennoy-realnosti-v-raketostroenii> (дата обращения: 04.06.2024). ■