

УДК 004.685.5

МЕТОДОЛОГИЯ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ХОЛДИНГА КАК СЛОЖНОГО, МНОГОСВЯЗНОГО, МНОГОВАРИАНТНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Г. Г. Куликов¹, А. В. Речкалов², А. В. Артюхов³

¹gennadyg_98@Yahoo.com, ²av@rechkalov.ru, ³artyukhov@uecrus.com

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^{2,3} ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО)

Поступила в редакцию 29.11.2020

Аннотация. Предложены концептуальные основы и формализованный метод структурной и параметрической идентификации системной динамической модели планирования и управления производством машиностроительного холдинга как многосвязного, многовариантного объекта управления на основе анализа данных производственной деятельности его предприятий. Определены необходимые и достаточные условия обеспечения идентифицируемости, прослеживаемости и управляемости производственной деятельности предприятий в условиях принятия решений (ПР) при адаптивном (структурно-параметрическом) и программном (функциональном) управлении. Приведен пример системной динамической модели производственной системы как многосвязного, многовариантного объекта управления в форме его динамической характеристики в трехмерной системе координатных осей – шкал (упорядоченная последовательность предприятий холдинга – упорядоченная последовательность временных периодов производственной деятельности – упорядоченная последовательность объемов производства (запасов и незавершенного производства, количество оборотов)).

Ключевые слова: машиностроительный холдинг; производственная система; динамическая модель (характеристика); структурно-параметрическая идентификация и управление; системное моделирование (системное описание); организационное управление; предметно-ориентированная область; принятие решений.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях сформировавшейся парадигмы общей цифровизации производственной деятельности моделирование интеллектуальных процессов организации, планирование, мониторинг и управление взаимосвязанными производственными объектами в пространстве и времени с учетом влияния внешней среды в реальном и виртуальном аспектах являются актуальными задачами. Системное моделирование – одна из основ-

ных составляющих организации любого процесса, в том числе и производственного. Необходимо также отметить, что процесс системного моделирования сам по себе – интеллектуальный, трудоемкий и объективный процесс. Развиваемая в настоящее время методология системной инженерии основана на гипотезе конструктивного формирования функциональных зависимостей между известными и неизвестными параметрами в виде формул, таблиц, графиков.

Результатом является, как правило, создание компьютерной информационной модели реальных или виртуальных объектов производства (изделий и др.), которая по аналогии с общей инженерией в области технической деятельности должна удовлетворять V-образной структуре жизненного цикла (ЖЦ). То есть модели должны быть верифицированы путем оценки степени соответствия их структуры и параметров реальным объектам [1–6]. Это необходимое условие применения этих моделей в процессах ПР при организации и управлении. Методологической основой решения этой задачи является формализация базовой системы шкал (координат) для определения (идентификации) пространственного и временного взаимодействия (отношений) производственных объектов холдинга, для их дальнейшего системного моделирования и управления их состоянием с применением математических методов идентификации и оптимизации. Сегодня существуют условия совместного решения задачи структурно-параметрической идентификации и системного моделирования производственных объектов с учетом ЖЦ их моделей. В литературе такие модели принято называть цифровыми двойниками [7].

Рассматриваются концептуальные основы системного моделирования (системного описания) производственной деятельности предприятий и идентификации (верификации) их моделей как взаимосвязанных, многовариантных объектов управления по реальным данным в составе машиностроительного холдинга (МХ).

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МХ

Производство как сложная система изначально в той или иной степени обладает свойствами динамического поведения. Это означает, что производственный процесс имеет множество состояний, определяемых изменениями во внешней и внутренней средах. Система управления производством выполняет задачу планирования и корректировки производственного процесса в зависимости от изменения внешних и внутренних параметров (спроса, доступности

ресурсов, изменения конструкции продукции и т. п.). Такая система может быть отнесена к классу сложных адаптивных систем [8, 9]. На рис. 1 приведена концептуальная структура функционирования системы управления производством как многосвязным, многовариантным объектом в условиях действия возмущений от внешней и производственной сред [6].

Характеристика динамики производства как сложной системы определяется характеристиками множества возможных взаимосвязанных производственных процессов. Производственные процессы (ПП) как динамические объекты обладают свободными (собственными) и вынужденными подпроцессами (движениями). Свободные движения должны быть устойчивыми (самоорганизующимися), чтобы обеспечить запланированные результаты деятельности.

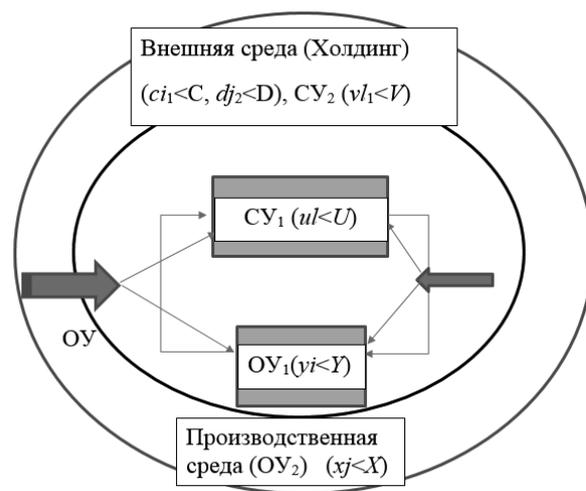


Рис. 1. Концептуальная структура функционирования системы управления производством в условиях действия возмущений от внешней и производственной сред

Здесь СУ – система управления производством; OY – объект управления – производство; \rightarrow реальные и информационные воздействия (связи) на производственную и управленческую деятельность. $V(i), X(j), U(l)$ – множества дискретных желаемых (плановых), возможных (неплановых, возмущенных) и управляемых в производственной среде состояний. I, J, L – мощности соответствующих множеств. $C(i_1), D(j_1), V(l_1)$ – множества дискретных желаемых (плановых), возможных (неплановых, возмущенных) и управляемых во внешней среде

(в холдинге) состояний производственной системы как объекта управления со стороны холдинга. I_1, J_1, L_1 – мощности соответствующих множеств.

АНАЛИЗ НЕОБХОДИМЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ МХ

Для математической формализации структуры системной модели производственной деятельности применим подход анализа состояний системы Эшби, основанный на определении связей между номинальными, порядковыми, интервальными и кардинальными переменными при описании состояния подсистем: регуляции, адаптации, самоорганизации и др. (По законам Эшби кибернетика рассматривает не вещи, а способы поведения) [10, 11].

Так, по логике Эшби для управления необходимы две петли обратной связи. Первый цикл обратной связи работает регулярно и вносит небольшие коррективы. Второй цикл работает нечасто и изменяет структуру системы, когда существенные переменные выходят за пределы, необходимые для выживания.

ОУ может находиться в планируемом состоянии $y_i, i = \{1, I\}$ допустимого множества Y и в состоянии $x_j, j = \{1, J\}$ возможного множества состояний X , включая планируемые состояния, определяемые производственной средой, тогда в соответствии с законом необходимого разнообразия Эшби для управляемости ОУ необходимо выполнение следующих условий.

Если управление u_k переводит состояние ОУ из x_j в состояние y_i , т. е. $u_k: x_j > y_i < Y < X$ и известны вероятности их реализаций, тогда ОУ будет неуправляемым, если $H(y) > H(x)$, где $H(\dots)$ – энтропия. Целью управления является снижение энтропии $H(y)$, т. е. повышение вероятности нахождения ОУ в состоянии $Y, H(y) < H(x)$. Это означает, что

$$H(y) > H(x) - I(u, x), \quad (1)$$

где $I(u, x) = H(u) - H(u/x)$ – количество информации в u об x , а $H(u/x)$ – условная энтропия.

То есть разнообразие (энтропию) состояний ОУ можно понизить не более чем на величину количества информации в УС об ОУ, которое равно разнообразию (энтропии) управления за вычетом потери информации от неоднозначного управления.

Таким образом, как в нашем случае, механизм управления по Эшби предполагает режим стабилизации целевых состояний $x_j \in Y$ и преобразования состояний $x_j \in X$, не входящих в множество Y , в Y . То есть условия Эшби обеспечивают стабилизацию целевых (желаемых) состояний $x_j \in Y$ в производственной среде X , т. е. адаптацию к этой среде. Если же множество состояний системы ОУ + СУ расширяется до их состояний во внешней среде D , то можно формировать по правилам Эшби систему управления и адаптации второго контура. Обобщая, можно сказать, что адаптивный канал управления – это канал связи состояния системы с внутренним контуром и одновременно с новыми состояниями во внешнем контуре.

Покажем, что данный подход позволяет формализовать структуру модели многоуровневого управления производством на основе наблюдаемости (измеримости) за состоянием желаемых и возможных состояний системы и формирования необходимых и достаточных управлений (управляемости) из условия логической устойчивости (сходимости) к желаемым состояниям. В теории автоматического управления (ТАУ) для решения такого класса задач применяют методы теории структурной и параметрической идентификации реальных систем. Очевидно, что наличие логически непротиворечивой (исключающей ошибки первого и второго рода) идентифицированной структуры производственной системы является необходимым условием для построения ее цифрового двойника путем машинного обучения.

Для полного структурного описания логики отношений между множеством возможных состояний производственной системы X и планируемых (целевых) состояний Y применим модель в форме логического квадрата Декарта и теории множеств (рис. 2) [12, 13].

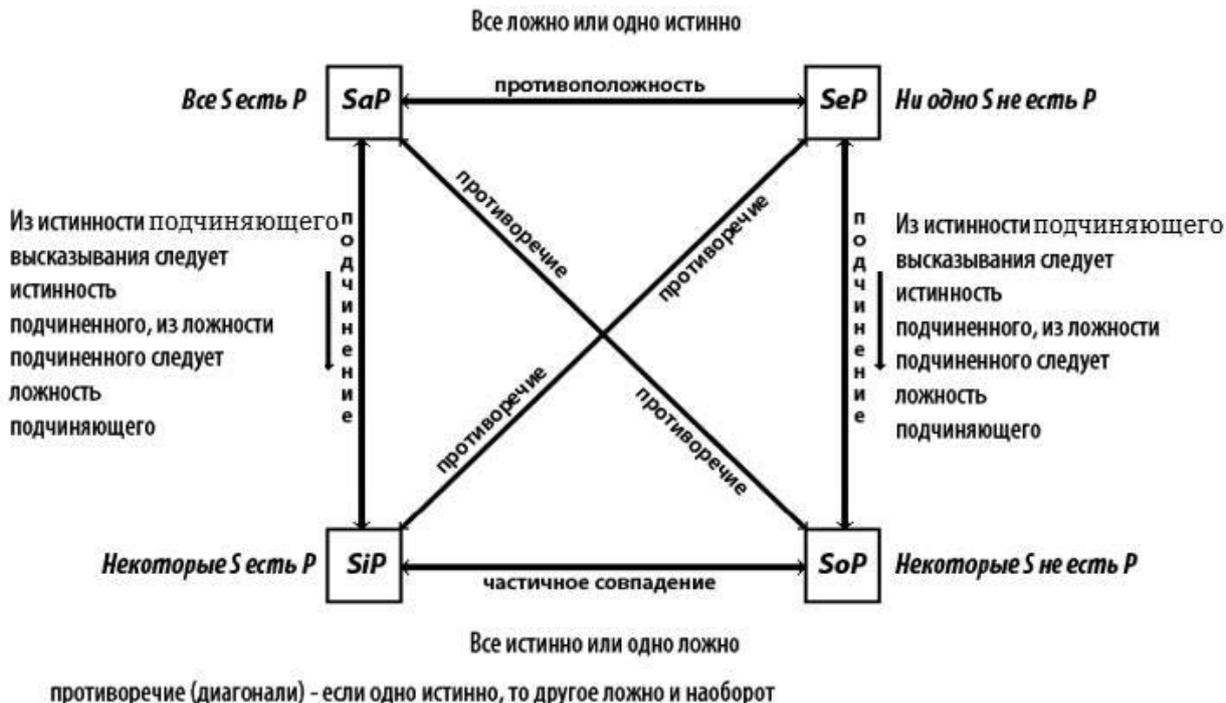


Рис. 2. Схема отношений между множеством планируемых (целевых) состояний $S = Y$ и возможных состояний производственной системы $P = X$

Для исключения логических противоречий и обеспечения целостности системы построим модель, удовлетворяющую основным положениям теории категорий множеств.

Для исключения структурных противоречий в системе (сохранения целостности исходных объектов и системы в целом) и реализации принципа ОС отношения между объектами с бинарной внутренней структурой должны быть направленными, мономорфными (инъективными или функциональными) и отвечать условиям композиции.

В нашем случае это объект $Об_1$ – множество плановых состояний Y в множестве состояний ПС X , $Об_2$ – множество состояний ПС $X_{пр.}$ вне множества плановых состояний $X_{пл.}(Y)$ и $Об_3$ – множество $Y = X_{пл.}$.

В этом случае можно построить схему структурной композиции с мономорфными (функциональными) отношениями между обозначенными объектами $Об_1, Об_2, Об_3$ (рис. 3).

Путем естественных преобразований данная композиция может порождать новый бинарный объект с подмножеством собственных состояний во множестве возможных состояний, определяемых внешней средой.

Отметим также, что указанные выше преобразования раскрывают формальный алгоритм преобразования логического квадрата Декарта до логического треугольника Н. А. Васильева в исследуемой предметной области производственной деятельности [14].

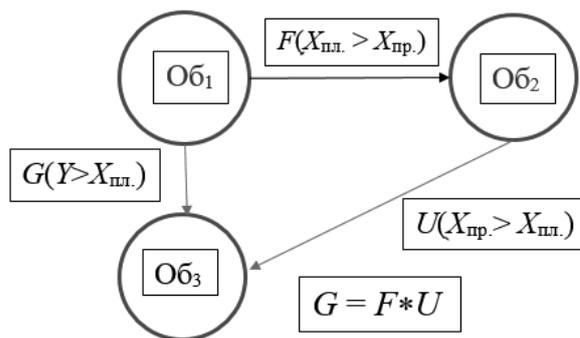


Рис. 3. Схема структурной композиции с мономорфными (функциональными) отношениями

Основным механизмом реализации эффективного управления производством является сформированная технология принятия и исполнения управленческих решений (ПР) на основе качественной информации и использования интеллектуальных информационных систем и систем поддержки принятия решений (ППР).

Следовательно, цель эффективного управления можно сформулировать как поиск вариантов принятия и исполнения управленческих решений, обеспечивающих наиболее эффективное взаимодействие и использование производственных ресурсов.

Эффективная модель промышленного предприятия основывается на модели анализа состояния производственного процесса и прогноза возможных последствий принятых управленческих решений, что требует решения задачи структуризации и параметризации производственной модели, т. е. выявления минимально необходимого набора данных, описывающих поведение объектов управления и в то же время достаточных для оценки результатов принятых решений. Соответственно, методология эффективного управления должна быть основана на разработке системы количественных и качественных показателей, определяющих в соответствующей системе координат возможные состояния ОУ и его СУ в производственной и внешней средах. Это позволит выделять в них целевые состояния и формировать допустимые плановые (управляемые) траектории их достижения [15–20].

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВА ВОЗМОЖНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В СОСТАВЕ ХОЛДИНГА ПО РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Известно, что производственная система является динамической системой. Это значит, что она обладает «производственной» памятью и моделируется дифференциальными и, конечно, разностными уравнениями. Учетные данные в реальном машиностроительном производстве являются одновременно дискретными и интегральными и

фиксируются в многомерных таблицах (реляционных БД). Схемы реляционных таблиц (метаданные) соответствуют конечным номинативным шкалам с переменными, обладающими свойствами упорядоченности, порядка, интервальности и кардинальности (порядковых чисел), т. е. обладают свойствами теории малой категории множеств с порядковой структурой и известными мощностями (количество объектов – элементов). Графически эти шкалы определяют ортогональную конечную дискретную систему координат, в которой могут быть заданы в неявной форме дифференциально-интегральные функции отношений между объектами – элементами [21].

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА КАК МНОГОСВЯЗНОГО, МНОГОВАРИАНТНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Формализуем трехмерную ортогональную ограниченную дискретную систему координат с упорядоченными номинативными шкалами <Предприятия холдинга, Время, Объемы производства >, в которой заданы объекты производства (производственные заказы) с параметрами <Объемы производства, Запасы, Оборачиваемость и др.>. В этой системе координат заданы параметры реальных дифференциально-интегральных состояний производственных объектов в форме совокупности таблиц, связанных реляционными отношениями. Дальнейшие рассуждения проведем на основе табличных данных и соответствующих им диаграмм, приведенных в работах [17, 20].

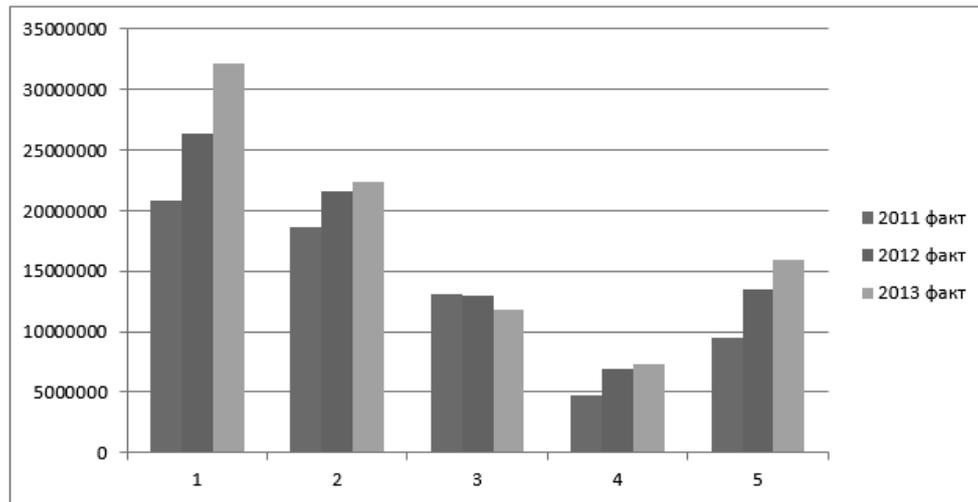


Рис. 4. Динамика объемов производства по предприятиям:
 $V_{Об.пр.}(I, j)$ (руб./год) – объем производства $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год
и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

Таблица 1

Исходные данные

Пр/Год	1/Пр ₁	2/Пр ₁	3/Пр ₁	4/Пр ₁	5/Пр ₁	5/Sum
1/2011	$V_{11/21}$	$V_{12/2}$	$V_{13/3}$	$V_{14/4,5}$	$V_{15/9}$	65,5
2/2011	26	22	13	4,6	14	79,6
3/2011	32	23	12	4,7	16	87,7
3	79	63	38	13,8	39	232,8/232

Таблица 2

Исходные данные

Пр/Год	1/Пр ₁	2/Пр ₁	3/Пр ₁	4/Пр ₁	5/Пр ₁	5/Sum
1/2011	9	14,5	8,5	5	12	49
2/2011	12,5	13,5	6	5,8	15	52,8
3/2011	17	17,5	7	6,5	15,5	63,5
3	38,5	45,5	21,5	17,3	42,5	165,3

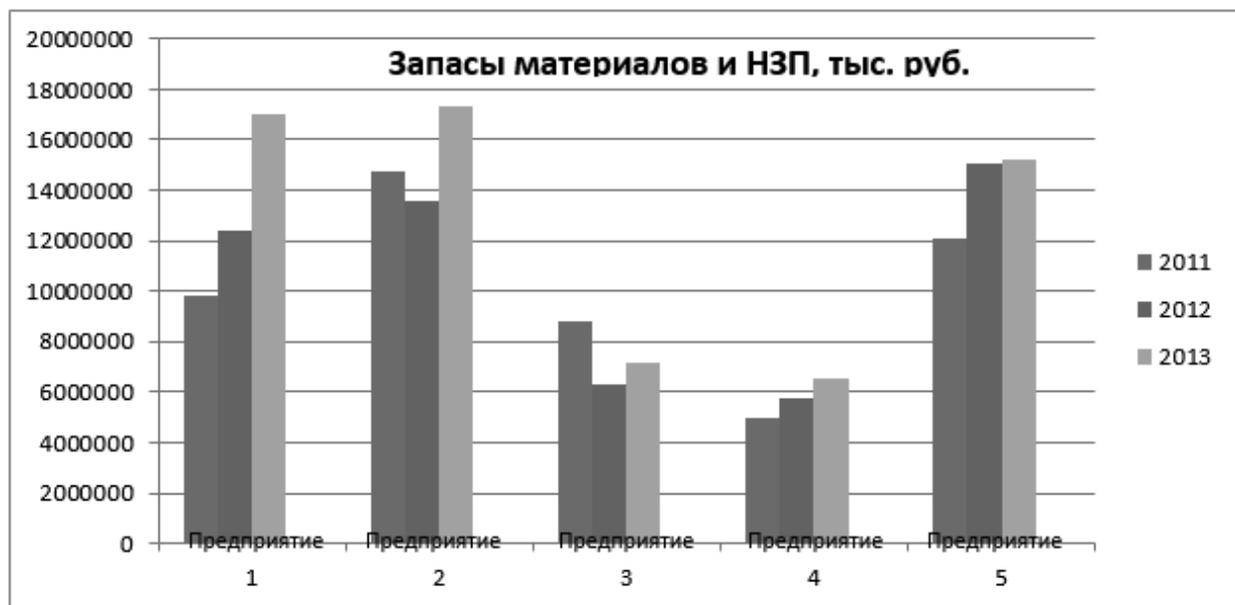


Рис. 5. Динамика запасов материалов и НЗП по предприятиям:
 $V_{об.зан.}(i, I, j)$ (руб./год) – объем запасов материалов и НЗП $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го
предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

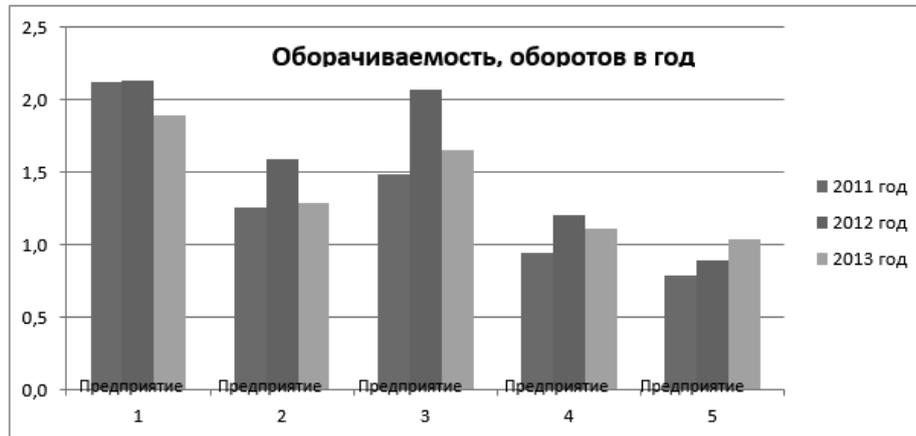


Рис. 6. Динамика оборачиваемости запасов материалов и НЗП по группе предприятий: $N(I, I, j)$ [K] – количество оборотов I -го предприятия в год и по годам J ($I = \{1, 2, \dots, 5\}$, $J = \{2011, 2012, 2013\}$)

Таблица 3

Исходные данные

Пр/Год	1/Пр ₁	2/Пр ₁	3/Пр ₁	4/Пр ₁	5/Пр ₁	5/Sum
1/2011	2,2	1,25*Y	1,5*Y ²	0,9*Y ³	0,8*Y ⁴	6,65
2/2011	2,22* <i>X</i>	1,6	2,1	1,2	0,9	8,02
3/2011	1,8* <i>X</i> ²	1,3	1,7	1,1	1,1	7
3	6,22	4,15	5,3	3,2	2,8	21,67

В обобщенной форме такое представление соответствует некоторой сложной дискретной модели, задаваемой системой числовых последовательностей, включая и сам натуральный ряд чисел. Она может быть представлена последовательностью

$$\Phi(i, l, j) = \Phi(\text{Пр.}(i) V_{\text{Об.пр.}}(I, I, j), V_{\text{Об.зап.}}(I, I, j), N(I, I, j)). \quad (2)$$

Реальное состояние производственной системы, как было отмечено выше, обладает памятью и, соответственно, определяется дифференциально-интегральными свойствами, т. е. ее моделью является сложная аналитическая функция, задаваемая в неявной, дискретной форме.

Для построения аналитической модели применим метод производящих функций [22].

Для описания интегральных свойств последовательности объемов производств, запасов и оборачиваемости по предприятиям построим производящие функции от параметра Y в виде:

$$V_{\text{Об.пр.}}(y, I, j) = A_0 + A_1 * y + A_2 * y^2 + A_3 * y^3 + A_4 * y^4; \quad (3)$$

$$V_{\text{Об.зап.}}(y, I, j) = B_0 + B_1 * y + B_2 * y^2 + B_3 * y^3 + B_4 * y^4; \quad (4)$$

$$N(y, I, j) = C_0 + C_1 * y + C_2 * y^2 + C_3 * y^3 + C_4 * y^4. \quad (5)$$

Отметим, что значения функций как определенных интегралов от $Y = 0$ до $Y = 1$ совпадают с табличными значениями.

Для описания интегральных свойств последовательности объемов производств, запасов и оборачиваемости по времени (годам) построим производящие функции от параметра X в виде:

$$V_{\text{Об.пр.}}(i, x, j) = D_0 + D_1 * x + D_2 * x^2; \quad (3a)$$

$$V_{\text{Об.зап.}}(i, x, j) = E_0 + E_1 * x + E_2 * x^2; \quad (4a)$$

$$N(I, x, j) = P_0 + P_1 * x + P_2 * x^2. \quad (5a)$$

Пример 1. Положим, что в информационно-советующей системе возникли вопросы: каким образом произойдет перераспределение объемов производства на предприятиях при условии изменения соотношения на заданную величину L объемов производства за полный период (за три года) и в течение трех лет; насколько при этом изменятся запасы и оборачиваемость?

Составим функциональную модель для искомого состояния производственной системы в соответствии с логикой поставленных вопросов, объединив уравнения 3 и 3а:

$$V_{\text{Об.пр.}}(y, I, j) - L * V_{\text{Об.зап.}}(i, x, j) = 0 \quad (6)$$

или

$$(A_0 + A_1 * y + A_2 * y^2 + A_3 * y^3 + A_4 * y^4) - L * (D_0 + D_1 * x + D_2 * x^2) = 0. \quad (6a)$$

Полагаем, что $y(x)$ функционально зависит от x , тогда ответом на поставленные вопросы будут решения дифференциального уравнения (7), в свою очередь являющегося решением (6a):

$$\frac{dy(x)}{dx} = \frac{L(D_1 x + 2D_2 x^2)}{A_1 + 2A_2 y + 3A_3 y^2 + 4A_4 y^3}. \quad (7)$$

**ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА
(ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗАКАЗА)
КАК МНОГОСВЯЗНОГО,
МНОГОВАРИАНТНОГО ОБЪЕКТА**

Качественный анализ табличных зависимостей показывает, что они соответствуют модели производственной системы, представляемой некоторой неявно выраженной непрерывной функцией многих переменных в исходной трехмерной системе номинативных шкал, т. е. системой дифференциальных или конечно-разностных уравнений. Известно, что в этом случае состояние динамической системы определяется в пространстве параметров состояния и алгебраически связанных с ними параметров наблюдения [23]. Отметим, что динамическая модель представима как в дифференциальной форме, так и в алгебраической операторной форме. Размерность пространства состояний определяется порядком системы дифференциальных уравнений или количеством переменных параметров состояния, обладающих интегрально-дифференциальными свойствами и сохраняющих системные свойства объекта в вышестоящей системе координат. Рассмотрим объемы производства как тождественные объекты производства (производственные заказы) с внутренними дифференциально-интегральными свойствами в пространстве динамических и статических параметров состояния, определенных в табличной форме в исходной координатной системе упорядоченных шкал (декартово пространство) <Предпр., Годы, Объем произ.>, имеющих общий

нейтральный (начальный) объект. В теории категорий множеств связанных объектов в дискретном пространстве это отношения суперпозиции, т. е. мономорфные стрелки. В этом случае отношения между внутренними динамическими состояниями объектов производства – их производственными процессами – будут также мономорфными стрелками. Интегральное значение параметра состояния объекта производства соответствует (целевому) значению (объема производства) процесса. Начальное значение – начало производства объекта. Длительность (период) производственного процесса T определяется длительностью производственного цикла. Для этих условий определим динамическую модель объекта производства как процесса. В первом приближении рассмотрим аperiодический производственный процесс, определенный как объект производства, в координатах пространства состояний.

На рис. 7 приведены основные соотношения аperiодического звена:

$$T * \dot{y}(t) + y(t) = kx(t);$$

$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right);$$

$$\omega(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}},$$

где $y = V_{\text{пр.}}(t)$; $x(t) = V_{\text{пр.ст.}} * 1$ при $k = 1$.

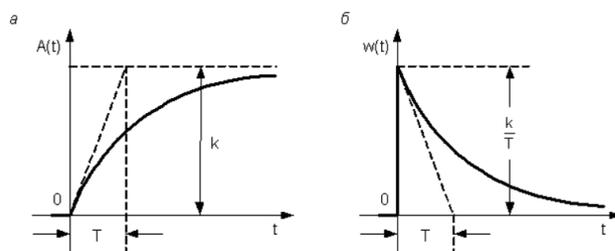


Рис. 7. Основные соотношения аperiодического звена

В математическом виде системная модель производственных процессов, неявно заданная в табличных формах (в форме реляционной БД), со свойствами малой теории категорий типа Set может быть представлена функциональной зависимостью в неявной форме [21]:

$$\Phi^{\text{табл}}(\text{Пред}(i, t, T), V(i, t, T), V^{\circ}(i, t, T), V^{\text{табл}}(i, t, T)) = \text{const}. \quad (8)$$

В аналитической форме (в явной форме) при $i = \text{const}$ и $T = \text{const}$, $V^{\text{табл}}(i, t, T) = \text{const}$:

$$(T/(3-4))V'(t) + V(t) = 1(t)V^{\text{табл}}. \quad (9)$$

Или на основании свойства суперпозиции при $T = \text{const}$:

$$(T/(3-4))V'(t) + V(t) = 1(t) V^{\text{табл}}(i, t). \quad (10)$$

Проведенные выше преобразования соответствуют известному утверждению академиков А. Н. Колмогорова и В. И. Арнольда, что любая непрерывная функция нескольких

переменных может быть представлена в виде комбинации конечного числа функций меньшего числа переменных. Это также является необходимым обоснованием возможности построения нейросетевой модели.

Нелинейную динамическую модель объекта производства можно представить в графоаналитической кусочно-линейной форме, в форме динамической характеристики и, соответственно, в форме искусственной нейронной сети по аналогии с техническими системами [21–23].

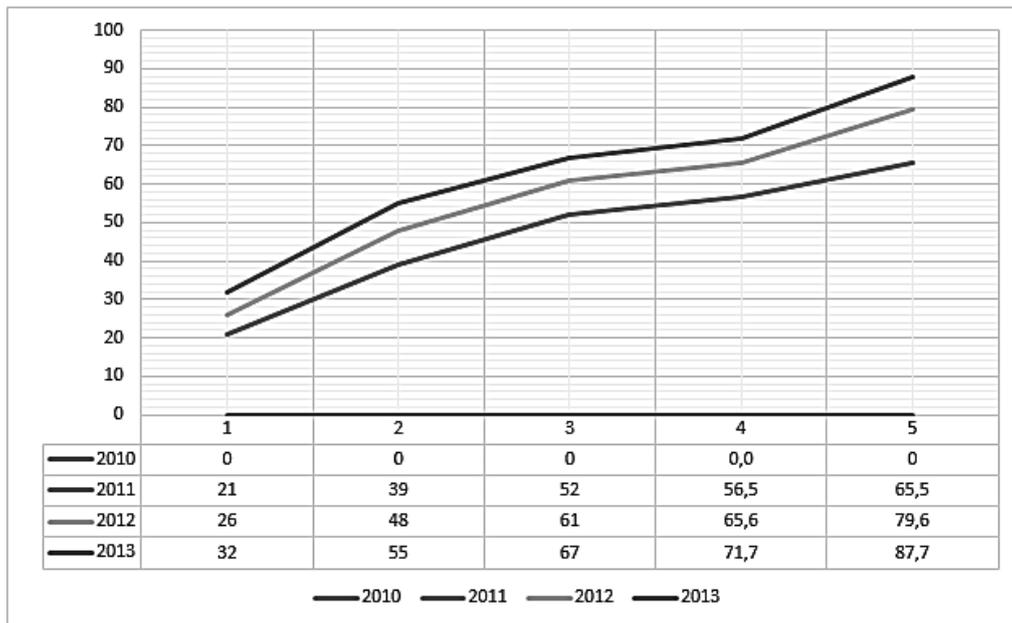


Рис. 8. Интегральная (Sum) динамика объемов производства по группам предприятий: $1 - \{1\}$, $2 - \{1, 2\}$, $3 - \{1, 2, 3\}$, $4 - \{1, 2, 3, 4\}$, $5 - \{1, 2, 3, 4, 5\}$. $V_{\text{Об.пр.}}(I, j)$ (руб./год) – объем производства $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

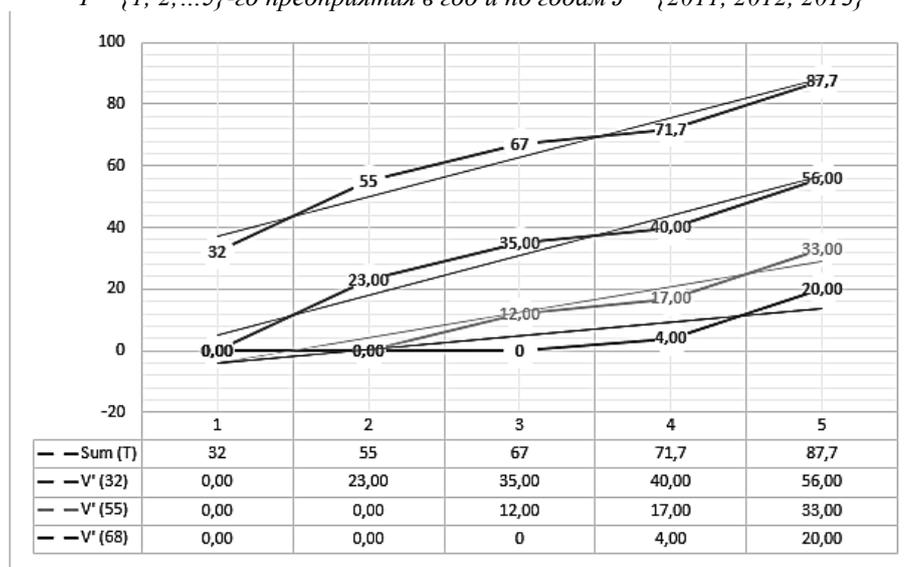


Рис. 9. Динамическая характеристика интегральной (Sum) динамики объемов производства по группам предприятий: $1 - \{1\}$, $2 - \{1, 2\}$, $3 - \{1, 2, 3\}$, $4 - \{1, 2, 3, 4\}$, $5 - \{1, 2, 3, 4, 5\}$. $V_{\text{Об.пр.}}(I, j)$ (руб./год) – объем производства $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

$V_{\text{пр}}(t) (0) = ((d V_{\text{пр}}(t))/(dt))|_{V_{\text{пр}} = \text{const}}$ в соответствии с уравнениями 8, 9, 10.

Представление системной модели в форме ДХ (в табличной и графической формах) позволяет исследовать свойства производственной системы при ее параметрическом расширении или сужении (с сохранением структуры) методами физического масштабирования (коэффициентов приведения).

Пример 2. Решим задачу структурного формирования производственного объекта и допустимых вариантов реализации его объекта производства (объема производственного заказа) при ПР.

Полагаем, что формируется объект производства (производственный заказ) в объеме $V_{\text{пр. зад.}}$, который необходимо выполнить за время (период времени) $T_{\text{произ.цикла}} > (=) T > (=) T_{\text{техн.цикла}}$ в пределах объемного плана загруженности предприятий холдинга. Определим возможные производственные процессы выполнения заказа $V_{\text{пр. зад.}}$ предприятиями холдинга. Для этого по ДХ, заданной в табличной и графической формах (рис. 9), выделим возможные производственные процессы, имеющие общие начальные условия (рис. 10), потенциально приводящие к выполнению заказов. Например, для производственных объектов с заданным значением объема производства $V_{\text{пр. зад.}} = 30$ (рис. 10) это варианты:

1-й вариант – {группа предприятий 1, объем $V_{\text{пр. зад.}} = 30, T = 2,8$ };

2-й вариант – {группа предприятий 2, объем $V_{\text{пр. зад.}} = 30, T = 0,8$ };

3-й вариант – {группа предприятий 3, объем $V_{\text{пр. зад.}} = 30, T = 0,6$ };

1-й вариант – {группа предприятий 4, объем $V_{\text{пр. зад.}} = 30, T = 0,5$ };

1-й вариант – {группа предприятий 5, объем $V_{\text{пр. зад.}} = 30, T = 0,3$ }.

Для дальнейшего принятия решения (ПР) по выбору варианта необходимо применить какой-либо критерий эффективности.

Обобщая, можно отметить, что по аналогии с приведенным примером для одного заданного объекта производства $V_{\text{пр. зад.}} = 30$ можно решить задачу и для заданного множества объектов, мощность которого будет определяться возможностями ERP, обеспечить идентифицируемость и прослеживаемость объектов производства в их производственных процессах.

Отметим, что допустимыми решениями поставленной задачи выступают и другие композиции производственных процессов. Можно также показать, что по ДХ генерируется необходимое множество производственных процессов для обучения нейросетевой модели производственной системы.

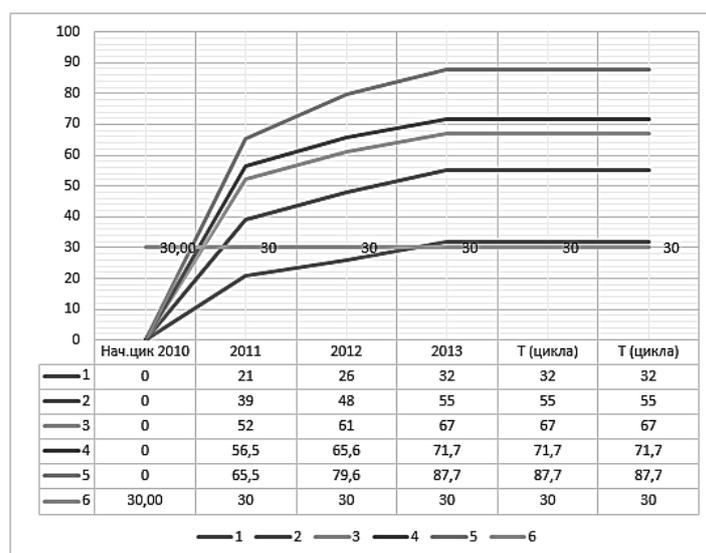


Рис. 10. Графики производственных процессов объектов производства, выполняемых группами предприятий: 1 – {1}; 2 – {1, 2}; 3 – {1, 2, 3}; 4 – {1, 2, 3, 4}; 5 – {1, 2, 3, 4, 5} внутри общего исследуемого производственного цикла холдинга; $V_{\text{Об.пр.}}(I, j)$ (руб./год) – объем производства $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методология структурно-параметрической идентификации динамической модели (характеристики) производственной системы машиностроительного холдинга как сложного, многосвязного, многовариантного объекта управления по реальным данным.

2. Исследованы необходимые условия идентифицируемости, прослеживаемости и управляемости адаптивной производственной системы исходя из принципа необходимого разнообразия по Эшби.

3. Исследован подход к структурно-параметрической идентификации динамической модели производственной системы на основе теории последовательностей и производящих функций.

4. Предложено представление системной модели в форме ДХ (в табличной и графической формах), позволяющее исследовать свойства производственной системы при ее параметрическом расширении или сужении (с сохранением структуры) методами физического масштабирования (коэффициентов приведения).

5. Разработан пример решения задачи структурного формирования производственного объекта и допустимых вариантов реализации его как объекта производства (объема производственного заказа) при принятии управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Системная инженерия** // Techinvestlab. [Электронный ресурс]. URL: http://techinvestlab.ru/techinvestlab/til_search (дата обращения 17.11.2020). [System Engineering // Techinvestlab (2020, Nov. 17). [Online]. Available: http://techinvestlab.ru/techinvestlab/til_search]
2. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005**. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 57 с. [*Information technology. System engineering. The process of the systems life cycle. Requirements*, (in Russian), Federal standard R ISO/IEC 15288-2005, Moscow, Standartinform, 2006.]
3. **ISO 9000** // Википедия. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_9000 (дата обращения 17.11.2020). [ISO 9000 // Wikipedia (2020, Nov. 17). [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_9000]
4. **Моделирование систем**. Подходы и методы: учеб. пособие / В. Н. Волкова [и др.]; под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 568 с. [*V. N. Volkova, et al., System modeling. Approaches and methods*, (in Russian). St. Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013.]
5. **Куликов Г. Г., Конев К. А., Суворова В. А.** Теория систем и системный анализ: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2012. 159 с. [G. G. Kulikov, K. A. Konev, V. A. Suvorova, *System Theory and system analysis: a textbook*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012.]
6. **Куликов Г. Г., Речкалов А. В., Артюхов А. В.** Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 4. С. 115–125. DOI:10.14529/ctcr200412 [G. G. Kulikov, A. V. Rechkalov, A. V. Artyukhov, "Methodology of system modeling of adaptive management of machine-building production", (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya "Kompyuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika"*, vol. 20, no. 4, pp. 115-125, 2020. DOI:10.14529/ctcr200412]
7. **Подход** к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 4 (86). С. 154–160. [G. G. Kulikov, et al., "Approach to the Application of the Concept of Digital Twin for the Transformation of the Corporate Information System Using the Requirements of INDUSTRY 4.0 (on the Example of Creating a UIS "UNIVERSITY-enterprise")", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154-160, 2019.]
8. **Городилов А. Б., Веселовская В. С.** Адаптивное управление наукоемким машиностроительным производством: монография. М.: Русайнс, 2017. 103 с. [A. B. Gorodilov, V. S. Veselovskaya, *Adaptive management of science-intensive machine-building production*, (in Russian). Moscow: Rusajns, 2017.]
9. **Жмурко Д. Ю.** Понятие, сущность и классификация адаптивного управления системами с организационной сложностью // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 90. С. 818–836. [D. Yu. Zhmurko, "Concept, essence and classification of adaptive management of systems with organizational complexity", (in Russian), in *Politematicheskij setevoj e'lektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, no. 90, pp. 818-836, 2013.]
10. **Эшби У. Р.** Введение в кибернетику. М.: КомКнига, 2006. 432 с. [W. R. Ashby, *Introduction to Cybernetics*, (in Russian). М.: KomKniga, 2006.]
11. **Закон** необходимого разнообразия. Википедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 17.11.2020). [The Law of Requisite Variety // Wikipedia (2020, Nov. 17). [Online]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>]
12. **Логический квадрат**. [Электронный ресурс]. URL: https://ic.pics.livejournal.com/poun/2971406/53967/53967_original.gif (дата обращения 01.01.2020). [Logical square (2020, Jan. 01). [Online]. Available: https://ic.pics.livejournal.com/poun/2971406/53967/53967_original.gif]
13. **Категория** множеств // Википедия. [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Категория_множеств (дата обращения 01.01.2020). [Category of sets // Wikipedia (2020, Jan. 01). [Online]. Available: http://ru.wikipedia.org/wiki/Категория_множеств]

14. **Речкалов А. В., Антонов В. В., Артюхов А. В.** Разработка формальной интегральной модели производственного процесса машиностроительного предприятия // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 4 (65). С. 125–133. [A. V. Rechkalov, V. V. Antonov, A. V. Artyukhov, "Development of formal integrated model of production of the machine-building enterprise", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 18, no. 4 (65), pp. 125-133, 2014.]

15. **Разработка** формальной модели производственно-го процесса для организации проектного и производственного менеджмента с применением интеллектуальной КИС / А. В. Речкалов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. № 11. С. 34–54. [A. V. Rechkalov, et al., "Development of a formal model of the production process for the organization of project and production management using intelligent CIS", (in Russian), in *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. E'lektrotehnika, informacionny'e tekhnologii, sistemy upravleniya*, no. 11, pp. 34-54, 2014.]

16. **Артюхов А. В.** Оборачиваемость оборотных производственных средств как ключевой индикатор и измеритель уровня организации процессов управления производственными системами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 2–5. С. 1193–1199. [A. V. Artyukhov, "Turnover of current production assets as a key indicator and measure of the level of organization of production system management processes", (in Russian), in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, vol. 17, no. 2-5, pp. 1193-1199, 2015.]

17. **Разработка** формальной модели производственно-го процесса для организации проектного и производственного менеджмента с применением рекурсивной системной модели / А. В. Речкалов [и др.] // Актуальные вопросы науки, технологии и производства: V международная научно-практическая конференция: сб. тр. СПб., 2015. С. 29–31. [A. V. Rechkalov, et al., "Development of a formal model of the production process for organizing project and production management using a recursive system model", (in Russian), in *Proc. Vth Int. scientific and pract. Workshop on Topical issues of science, technology and production*. SPb., 2015. Pp. 29-31.]

18. **Формальная** модель производственного процесса для организации проектного и производственного менеджмента / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2014. № 4. С. 175–186. [G. G. Kulikov, et al., "Formal model of the production process for the organization of project and production management", (in Russian), in *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*, no. 4, pp. 175-186, 2014.]

19. **Артюхов А. В.** Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2017. 20 с. [A. V. Artyukhov, *Methods and models for organizing the production process of a diversified machine-building enterprise as an object of management: Cand. Diss. Abstr.*, (in Russian). Samara, 2017.]

20. **Бесекиерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического управления. 4-е изд. СПб.: Профессия, 2003. 752 с. [V. A. Besekerskiy, E. P. Popov, *Theory of automatic control systems*. 4th ed., (in Russian). SPb.: Proffesia, 2003.]

21. **Kulikov G. G., Thompson Haydn A.** Dynamic Modelling of Gas Turbines / Identification, Simulation, Condition Monitoring and Optimal Control. London: Springer, 2004.

22. **Методика** построения нейросетевой модели двухвального ГТД с соблюдением условий структурной адекватности / Г. Г. Куликов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 9 (116). С. 68–73. [G. G. Kulikov, et al., "Method of constructing of neural network model of two-shaft Gas Turbine Engine under conditions of structural adequacy", (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 9 (116), pp. 68-73, 2014.]

23. **Методология** проектирования системных моделей рабочих процессов с применением предметно-ориентированных метаязыков / Г. Г. Куликов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 2. С. 45–55. [G. G. Kulikov, et al., "Methodology for designing system models of work processes using domain-oriented metalanguages", (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, vol. 20, no. 2, pp. 45-55, 2020.]

ОБ АВТОРАХ

КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич, проф. каф. АСУ (УГАТУ), д-р техн. наук.

РЕЧКАЛОВ Александр Васильевич, проф., д-р техн. наук, главный специалист ОДК УМПО.

АРТЮХОВ Александр Викторович, канд. техн. наук, генеральный директор ОДК УМПО.

METADATA

Title: Methodology for structural and parametric identification of a dynamic model of a machine-building holding's production system as a complex multi-connected, multi-variant control object.

Authors: G. G. Kulikov¹, A. V. Rechkalov², A. V. Artyukhov²

Affiliation:

¹ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

² Ufa Engine Industrial Association (UMPO), Russia.

Email: ¹gennadyg_98@Yahoo.com, ²av@rechkalov.ru, ³artyukhov@uecrus.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 113-125, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The conceptual basis and formalized method of structural and parametric identification of the system dynamic model of planning and production management of a machine-building holding as a multi-connected, multi-variant control object based on the analysis of data on the production activities of its enterprises are proposed. The necessary and sufficient conditions for ensuring the identifiability and manageability of production activities of enterprises in the conditions of decision-making (DM) with adaptive (structural-parametric) and software (functional) management are determined. An example of a system, dynamic model of a production system as a multi-connected, multi-variant control object in the form of its

Dynamic characteristics in a three - dimensional system of coordinate axes-scales (ordered sequence of holding enterprises – ordered sequence of time periods of production activity-ordered sequence of production volumes (inventory and work in progress, number of units)) is given.

Key words: machine-building holding; production system; dynamic model (characteristic); structural-parametric identification and management; system modeling (system description); organizational management; subject-oriented area; decision-making.

About authors:

KULIKOV, Gennady Grigorievich, Prof. of the Dept. Automated Control Systems (USATU), Dr. of Tech. Sci.

RECHKALOV, Alexander Vasilevich, Prof., Dr. of Tech. Sci., chief specialist of the UEC.

ARTYUKHOV, Alexander Victorovich, Cand. of Tech. Sci., Prof., General Director of UEC.