

ПОСТРОЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ОПИСАНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ И БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Некрасов И.В.,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
ivannekr@mail.ru

Правдивец Н.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия
pravdivets@ipu.ru

Аннотация. На основе представления предприятия как иерархии структурных единиц и совокупности бизнес-процессов осуществлен переход к формализованной системе уравнений состояния, позволяющей анализировать его динамику методами теории управления. Синтезированная модель используется для прогнозирования и поддержки принятия управленческих решений на уровне руководства компании.

Ключевые слова: моделирование предприятия, бизнес-процесс, КПЭ (ключевые показатели эффективности), методология ARIS, нотация EPC, оптимальное управление, операционное управление предприятием, цифровое предприятие, цифровой двойник, нелинейная модель, анализ на чувствительность.

Введение

Научный подход к задачам управления предприятием получил в последние годы дополнительный импульс в связи с интенсивным развитием информационных технологий и всеобщей цифровизацией общества в целом, и предприятий в частности [1]. Идея цифрового предприятия вобрала в себя такие современные научные направления, как прогнозирование, оптимизация, имитационное моделирование, сценарное планирование и проч. При этом, при анализе постановок и формализации перечисленных локальных задач менеджмента естественным является переход к обобщению всего процесса управления предприятием в виде единого контура [2]. При таком подходе в системе менеджмента предприятия появляется общая методологическая база, направленная на формальное описание объекта, его структуры и протекающих в нем процессов, а также на сведение общей задачи управления к одной из стандартных постановок – например, описанию в переменных состояния [3], управлению по прогнозной модели [4], многоконтурной обратной связи [5] и прочим методам из классической теории автоматического управления [6]. Общим требованием всех методов теории управления является наличие формального описания всех компонентов объекта/системы в стандартном единообразном виде (например, в виде переменных и уравнений состояния). В настоящей работе предложена методика создания математической модели предприятия в виде уравнений состояния. Основываясь на описании бизнес-процессов в виде иерархии схем ARIS [7] и структурной модели предприятия в виде иерархии штатных единиц [8], методика определяет порядок соотношения двух перечисленных иерархий через связующую матрицу [9], назначает переменные состояния и управления объекта и, в конечном итоге, дает замкнутую систему единообразных уравнений, составляющих основу нелинейной имитационной модели предприятия.

1. Управление предприятием по принципу обратной связи

Постановка задачи управления предприятием существенно зависит от типа организации, его структуры, взаимодействующей среды, целей и ограничений менеджмента и проч. Однако, если рассматривать предприятие как объект управления в формальном смысле, выделяя такие понятия как переменные состояния и управляющие сигналы, то классическая схема управления по обратной связи [6] будет применима к любым вариациям задач менеджмента и будет выглядеть следующим образом:

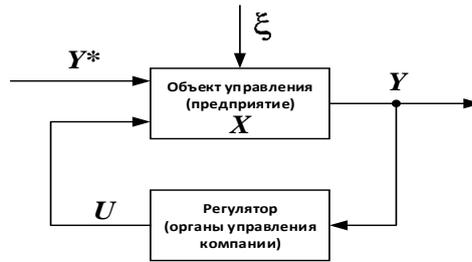


Рис. 1. Предприятие как объект управления с обратной связью

На рис. 1 приняты следующие обозначения переменных:

- X – вектор состояния объекта управления, т.е. набор измеримых параметров, характеризующий текущую ситуацию. Для предприятия определяется основными экономическими и техническими показателями его деятельности.
- Y – вектор выходных сигналов объекта управления, является абсолютно измеримым (вычислимым) — различные экономические метрики, по которым осуществляется управление предприятием (доходы предприятия, объем выпуска, рентабельность и проч.)
- Y^* – вектор желаемых значений выходных сигналов объекта управления. Представляет количественное выражение цели управления (целевое состояние по измеряемым КПЭ).
- U – управляющие воздействия. Любые управленческие решения, приводящие к изменению устоявшегося состояния. Для верхнеуровневого экономического управления удобно все управляющие воздействия представлять в виде эквивалентных денежных потоков или инвестиций. Более детальное представление допускает прямой анализ технических показателей, однако их связь с целевыми экономическими показателями должна быть формализована дополнительными зависимостями.
- ξ – внешние возмущения. Это могут быть любые неконтролируемые изменения внешней среды (изменение цен на сырье и конечную продукцию, спроса, шаги конкурентов и т.п.).

Рассматривая регулятор рис.1, состоящий из исполнительного механизма и алгоритма его применения, легко заметить, что ключевую роль играет параметр желаемого состояния системы Y^* , унаследованный из классической постановки задачи управления в замкнутом контуре отрицательной обратной связи [6]. При переходе к оптимизационному подходу к управлению [10] Y^* войдет в целевую функцию в явном или косвенном виде, т.е. схема управления рис.1 будет преобразована к виду:

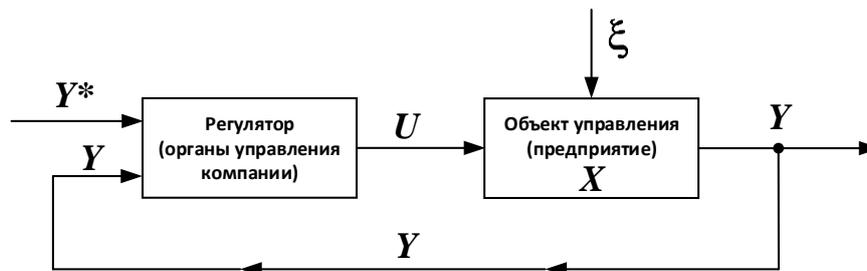


Рис. 2. Предприятие как объект управления с оптимизационной обратной связью

Следует заметить, что корректный выбор целевых показателей и их значений Y^* напрямую определяет разрешимость полученной задачи управления. Например, при управлении несколькими параметрами состояния, оптимизационная функция регулятора, приближающая его к желаемой точке, может выглядеть следующим образом:

$$\sum_{n=1}^N \mu_n \cdot |Y_n^* - Y_n| \rightarrow \min \quad (1)$$

где $n = 1, \dots, N$ – индекс управляемой выходной переменной

Очевидно, что при выборе противоречивых переменных (например, Y_1 – совокупные расходы предприятия, Y_2 – доходы предприятия), либо при необоснованном установлении их желаемых значений (например, отсутствие расходов $Y_1^* = 0$) критерий (1) теряет физический (экономический)

смысл, а задача в целом может не иметь допустимых решений. Если желаемая точка состояния неизвестна, есть смысл ограничиваться абсолютной максимизацией/минимизацией одной переменной:

$$Y_n \rightarrow \min/\max \quad (2)$$

При этом, допустимость решения оптимизационной задачи будет определяться учетом ограничений, накладываемых на ресурсы и порядок их использования.

1.1. КПЭ предприятия как критерий оптимизации задачи управления

Для предприятия характерна оптимизация второго типа, когда выбирается одна или несколько величин для максимизации/минимизации, а на остальные величины накладываются ограничения [11].

В теории менеджмента оптимизируемые параметры деятельности предприятия получили название «Ключевые Показатели Эффективности» или КПЭ [12]. Единый КПЭ предприятия, задаваемый на высшем уровне, как правило неприменим напрямую на более низких уровнях. Логичным выходом в такой ситуации является каскадирование КПЭ от высшего уровня вниз по структурным единицам. Однако, такой подход возможен не во всех случаях [13] – вышестоящий КПЭ должен быть вычислимым и явно зависимым от КПЭ более низких уровней. В настоящей работе ограничимся исследованием вычисляемых и явно прослеживаемых КПЭ. Типичным примером КПЭ коммерческого предприятия является показатель рентабельности

$$\left[i = \frac{D - P}{P} \right] \rightarrow \max \quad (3)$$

где D – совокупный доход предприятия за контрольный период времени;

P – суммарные расходы предприятия за контрольный период времени;

i – показатель рентабельности.

Рентабельность в явном виде зависит от доходов и расходов предприятия, которые подсчитываются по строго определенным статьям [14] для каждой структурной единицы. Формализация связи КПЭ, структурных единиц и бизнес-процессов в единую модель рассмотрена далее в настоящей работе.

1.2. Оптимальное управление по прогнозной модели

Возвращаясь к классической постановке задачи управления по обратной связи [6], проводя прямую аналогию между КПЭ [12] предприятия и целевой функцией оптимизации управляющего контура [10], придем к задаче синтеза закона управления в терминах теории автоматического управления, то есть к необходимости детальной формальной проработки модели функционирования регулятора, изображенного на рис. 1 и 2. В современной постановке расчеты регулятора так или иначе опираются на знания о поведении управляемого объекта, то есть на некоторую его абстракцию или модель [15]. Данная формализация в англоязычной литературе получила название *Model-Predictive Control* или *MPC* [4] и, по сути, заключается в разделении понятия «регулятор» на собственно модель объекта, и прогнозный оптимизационный алгоритм, осуществляющий вычисления с ее помощью (см. рис. 3).

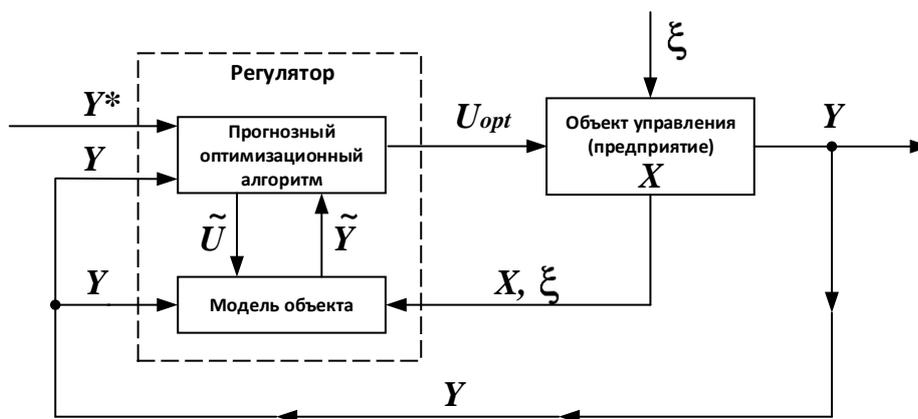


Рис. 3. Model Predictive Control: Контур управления предприятием на основе Оптимизационного алгоритма с использованием модели объекта

Таким образом, исходная задача управления сводится к сравнению прогнозных вариантов поведения объекта (обозначены как \tilde{Y} на рис. 3), рассчитанных на основе различных вариантов

управляющего сигнала (обозначены как \tilde{U} на рис.3), который генерируется оптимизационным алгоритмом и подается на математическую модель (аппроксимацию), выступающую в роли вычислителя состояния объекта для будущих моментов времени. Для полноценной реализации принципа МРС требуется создание модели, отвечающей следующим требованиям:

- структурная определенность, то есть четкое разграничение переменных на входные (управляющие), состояния и выходные;
- измеримость (наблюдаемость) выходных переменных как минимум в части КПЭ;
- однозначность;
- детализация, достаточная для решения поставленных задач управления;
- единообразие зависимостей (единый стиль представления, например: уравнения, матричная форма, передаточные функции, сетевые структуры и т.п.)

Построение модели предприятия в формальном виде осуществляется на основе доступных описаний его процессов и структуры и проведено в следующей главе. В качестве единого формата выбрано описание объекта выбранными уравнениями в пространстве состояний [3].

2. Построение модели предприятия относительно переменных состояния

В широком смысле слова математическое моделирование представляет собой набор сформировавшихся подходов и методов, позволяющих получить описание исследуемого объекта в виде некоторых формальных зависимостей [15]. В современной интерпретации непосредственно модель как правило неразрывно идентифицируется с ее программной реализацией [16], а процесс имитационного моделирования представляется как серия вычислений для различных входных данных. По сути, данный подход и является практической реализацией современной концепции цифрового двойника [17], вариативность которой определяется исключительно методами, выбранными для записи математической модели и расчетов на ее основе.

С точки зрения построения модели предприятия, базовыми исходными данными являются:

- описание цели деятельности или КПЭ предприятия [11, 12] – прямая аналогия с целевой функцией классического оптимального управления [10];
- структура предприятия (разделение на департаменты, отделы, управления и т.п. [8]) – аналогия структурной декомпозиции объекта и выделения контуров управления [5];
- описание бизнес-процессов предприятия [7] – аналогия функциональных и процессных связей между компонентами и подсистемами объекта [6], определяющих его динамику.

Следует заметить, что в процессе построения общая высокоуровневая модель предприятия декомпозируется на совокупность частных моделей, описывающих отдельные процессы и функции, координация которых зачастую выделяется в отдельную совокупность процессов управления, закрепленную в карте бизнес-процессов (см. далее в §2.1). Общее деление по функциям (зонам ответственности) осуществляется на уровне структурных единиц предприятия (см.рис. 4):

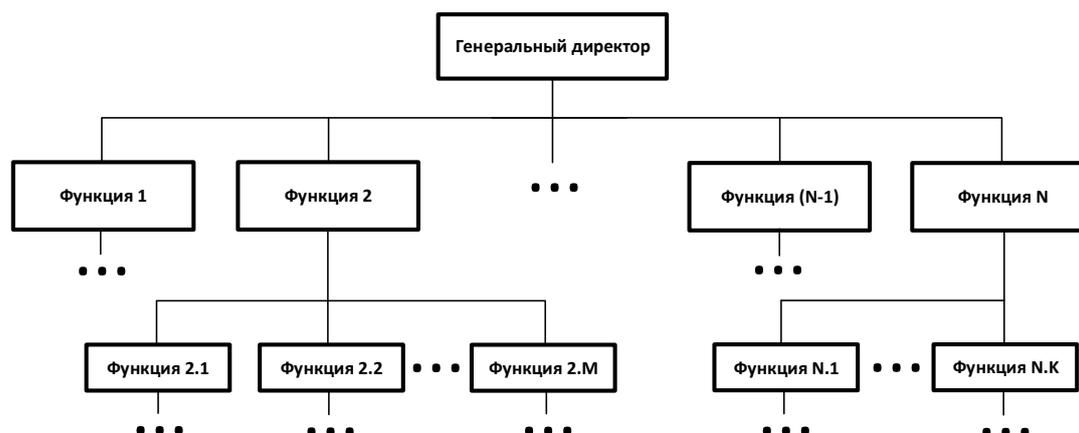


Рис. 4. Декомпозиция предприятия как объекта управления: разделение функций по структурным единицам

Как показано далее в §2.1, основная сложность построения модели предприятия заключается в том, что практически все бизнес-процессы предприятия являются сквозными по отношению к его организационно-штатной структуре (см. рис. 4), то есть не укладываются в зону ответственности

одного подразделения (функции). Это приводит к необходимости учитывать взаимодействие подразделений при моделировании – другими словами, по аналогии с объектами классической теории автоматического управления [6], в системе предприятия присутствуют сильные перекрестные связи, препятствующие выделению изолированных каналов управления по отдельным переменным.

2.1. Описание предприятия как карты бизнес-процессов в привязке к структурным единицам

Как показано в [7], определение предприятия как частного случая организации закреплено в Международном стандарте ИСО 9000:2000, при этом обязательным в организации является не только наличие ресурсов (прежде всего работников и необходимых средств), но и установленное между ними распределение ответственности, полномочий и взаимоотношений. Современный системный подход к описанию деятельности предприятия, заключающийся в графическом представлении указанных взаимоотношений, получил название *ARIS* [7], от англ. *Architecture of Integrated Information Systems* – архитектура интегрированных информационных систем. Главным средством пошагового графического представления деятельности является блок-схема описания бизнес-процесса (см. рис.5).

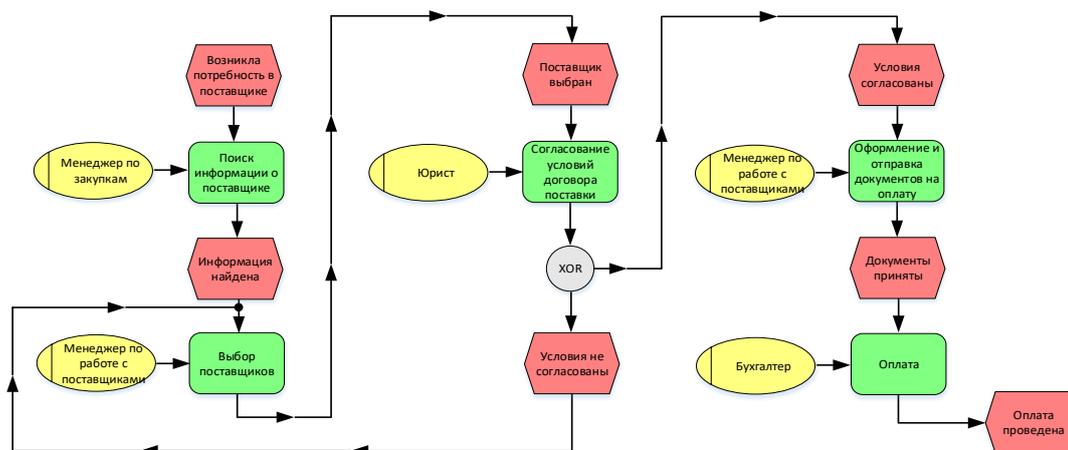


Рис. 5. Пример бизнес-процесса в нотации EPC

Правила документирования бизнес-процессов ARIS [7] предписывают, что на каждый шаг бизнес-процесса назначается ответственный исполнитель (см. рис. 5), который и определяет принадлежность шага конкретному структурному подразделению (см. рис. 4), т.е. однозначно указывает на зону ответственности последнего. Совокупность описаний всех бизнес-процессов сводится, как правило, в общую карту бизнес-процессов с их одновременной классификацией на основные, обеспечивающие и процессы управления [18]. Карта бизнес-процессов показывает сквозную логику функционирования предприятия, а также выявляет точки взаимодействия процессов друг с другом, см. рис. 6 ниже:

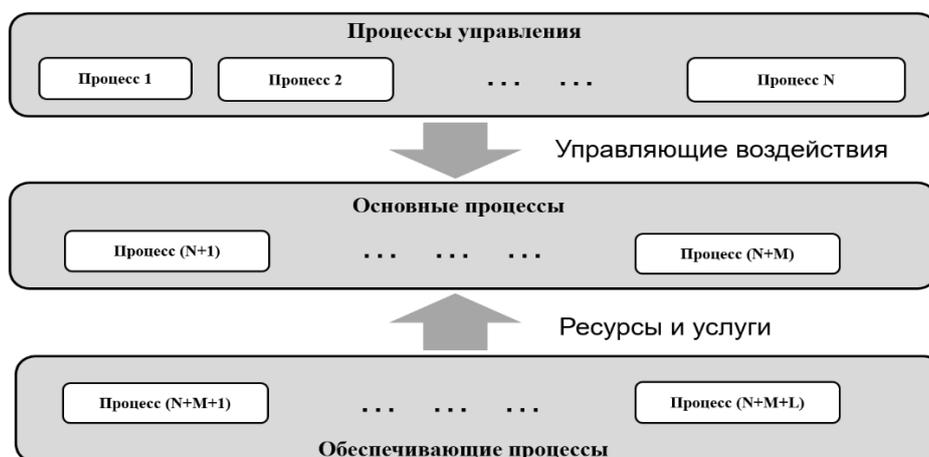


Рис. 6. Пример карты бизнес-процессов предприятия

При этом, как показано в [18], взаимодействие бизнес-процессов осуществляется через функции, ресурсы и цели. Это взаимодействие и определяет динамику предприятия как объекта управления в виде контуров обратной связи – по аналогии с теорией многосвязных систем управления [5]. Как

следует из самой цели создания и существования любого предприятия, его функционирование тесно связано внешним миром – с точки зрения методологии ARIS это означает, что информация на вход бизнес-процесса поступает не от внутреннего элемента, а от внешнего источника.

2.2. Формализация вовлеченности структурных единиц в бизнес-процессы предприятия

С целью уточнения вклада каждого структурного подразделения в итоговый результат работы предприятия необходимо проанализировать трудозатраты участников в каждом шаге «доходных» и «расходных» бизнес-процессов. На практике в современных процессных компаниях активно используется подход распределения затрат подразделений на бизнес-процессы предприятия, получивший название «Activity Based Costing» [19]. В данной работе предлагается распространить данный подход также для распределения доходов, приносимых конкретным бизнес-процессом, на подразделения предприятия пропорционально их участию в «доходном» бизнес-процессе. С учетом предложенного обобщения на основании методики [19], введем коэффициент участия j -го структурного подразделения в k -м процессе. Соответственно, в зависимости от того, является процесс доходным или расходным, его доходы и затраты будут распределяться между подразделениями пропорционально трудозатратам последних

$$\alpha_{kj} = \frac{TЗ_{kj}}{TЗ_{k_общ}} \quad (4)$$

где $TЗ_{kj}$ – трудозатраты j -го структурного подразделения в k -м бизнес-процессе;

$TЗ_{k_общ}$ – общие трудозатраты k -го бизнес-процесса.

Числовые значения $TЗ_{kj}$ и $TЗ_{k_общ}$ определяются прямыми подсчетами на основании анализа блок-схемы процесса. Учитывая, что правила документирования бизнес-процессов требуют назначения ответственного исполнителя на каждый шаг, коэффициент участия можем рассчитать на основании подсчета количества операций каждого структурного подразделения в бизнес-процессе по формуле:

$$\alpha_{kj} = \frac{\sum_{n=1}^N \begin{cases} 1, & \text{если работа} \in j; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}}{N} \quad (5)$$

где j – индекс подразделения;

k – индекс бизнес-процесса;

n – индекс шага бизнес-процесса;

N – общее количество шагов бизнес-процесса.

Таким образом, индекс α_{kj} отображает отношение количества шагов бизнес-процесса, которые выполняются j -м подразделением, к количеству всех шагов бизнес-процесса.

Результаты расчетов, проведенных по формулам (4-5), целесообразно свести в «матрицу вовлеченности», показывающую степень участия каждого подразделения в бизнес-процессах компании:

Таблица 1. Матрица вовлеченности структурных единиц предприятия в бизнес-процессы

Подразделение \ Бизнес-процесс	Подр ₁	Подр ₂	...	Подр _{j}
БП ₁	α_{11}	α_{12}	...	α_{1j}
БП ₂	α_{21}	.	.	\vdots
...	\vdots	.	.	\vdots
БП _{k}	α_{k1}	α_{k2}	...	α_{kj}

Следует заметить, что введенная нами матрица вовлеченности есть обобщение матрицы ответственности, введенной в [9], и связывающей бизнес-процесс с его владельцем в орг.структуре предприятия. В [9] матрица используется для поиска ошибок в распределении бизнес-процессов по подразделениям – в частности, присутствие в строке матрицы более одного ненулевого элемента α_{kj} =

$\alpha_{kj} \neq 0$ свидетельствует о том, что за один и тот же бизнес-процесс отвечает несколько подразделений, что недопустимо. Однако данный тезис следует модифицировать для так называемых сквозных процессов, которые по определению не могут осуществляться в рамках одной структурной единицы. В нашем обобщении мы расширяем понятие «ответственность» до понятия «участие в процессе в процентном соотношении» и, следовательно, преобразуем требование к коэффициентам α_{kj} табл.1 таким образом, что их сумма по каждой строке должна составлять 100%.

$$\sum_{j=1}^J \alpha_{kj} = 1 \quad (6)$$

Таким образом, доходы и расходы любого процесса предприятия могут быть разделены между подразделениями с весовыми коэффициентами α_{kj} . Данный подход, по сути, является упрощенной версией системы трансфертного ценообразования [20], причем объединяет в себе как затратный метод (в части обеспечивающих процессов и процессов управления), так и метод распределения прибыли (в части основных процессов предприятия). Упрощение подхода трансфертного ценообразования в выбранной постановке заключается в том, что коэффициенты распределения α_{kj} основываются только на трудозатратах подразделений без учета их внутренней маржинальности или рентабельности. Преобразование выбранного подхода в полноценную систему трансфертного ценообразования выходит за рамки настоящей работы и будет рассмотрено в рамках отдельного исследования.

2.3. Формирование стандартного вида модели «вход-состояние-выход»

Установив влияние каждого структурного подразделения на каждый бизнес-процесс предприятия, имеем $K \times J$ коэффициентов его внутренних перекрестных связей как объекта управления (K – количество бизнес-процессов, J – количество структурных единиц). С экономической точки зрения, при рассмотрении предприятия как системы финансовых потоков, в качестве переменных состояния целесообразно выбирать доходные и расходные статьи каждого k -го бизнес-процесса: $\{P_k; D_k\}$.

Тогда, имея матрицу коэффициентов (см.табл.1), k -ю статью расходов и доходов представим в виде:

$$P_k = \sum_{j=1}^J \alpha_{kj} \cdot P_j \quad (7)$$

$$D_k = \sum_{j=1}^J \alpha_{kj} \cdot D_j \quad (8)$$

где j – индекс подразделения;

k – индекс бизнес-процесса;

P_k, P_j – расходы, распределенные по бизнес-процессам (k) и структурным единицам (j);

D_k, D_j – доходы, распределенные по бизнес-процессам (k) и структурным единицам (j);

Статьи расходов P_j по каждому j -му подразделению являются управляемыми переменными, которые менеджмент предприятия может использовать для регулирования деятельности каждого подразделения в разрезе его влияния на общий результат. Формула расчета доходов (8) имеет крайне ограниченное применение, т.к. доходы каждого подразделения D_j в отрыве от процессов неизмеримы. Вместо денежного эквивалента деятельность каждого подразделения целесообразно оценивать в виде относительных показателей производительности или эффективности, рассчитываемых относительно некоторого базового значения (например, определенного по какому-либо периоду в прошлом)

$$D_k = D_k^{\text{база}} \cdot \sum_{j=1}^J \alpha_{kj} \cdot K_{\text{персонал}_j} \quad (9)$$

где D_k – доходная часть k -го бизнес-процесса;

$D_k^{\text{база}}$ – некоторое базовое значение доходной части k -го бизнес-процесса;

α_{kj} – коэффициенты участия j -х структурных единиц в k -м бизнес-процессе;

$K_{\text{персонал}_j}$ – коэффициент производительности j -й структурной единицы, рассчитываемый исходя из численности и принятой на предприятии модели стимулирования. Базовое значение коэффициента по отношению к предыдущему периоду принимается равным 1.

Замечание: очевидно, что реальная зависимость эффективности персонала от объема стимулирования (зарботной платы) является существенно нелинейной и имеет весьма подробно описанные тенденции и подходы управления [21]. В настоящей работе для аппроксимации модели повышения эффективности производственной деятельности при повышении оплаты труда использованы данные Росстата за 2012-2022гг [22], подробная модель представлена ниже.

Таблица 2. Исходные данные Росстата:

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
з.п., руб	29 437	32 231	34 808	36 865	39 629	44 632	47 482	50 382	53 157	57 804	65 452
индекс роста з.п.	109,2	109,5	108,0	105,9	107,5	112,6	106,4	106,1	105,5	108,7	113,2
индекс произв	101,6	98,3	99,2	100,4	102,9	99,9	103,0	100,2	99,2	105,7	100,8

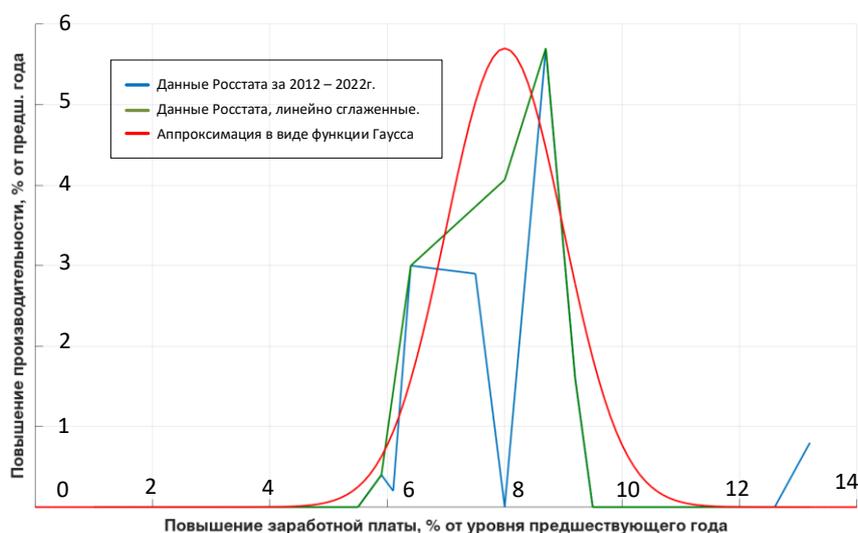


Рис. 7. Повышение производительности труда в зависимости от повышения уровня оплаты труда

На рис. 7 показано приращение эффективности работы персонала в зависимости от приращения оплаты труда на основе реальных данных, аппроксимированное нормальным распределением:

$$K_{\text{персонал}_j}(T) = \left(1 + (-1)^m \int_0^{\text{РФОТ}_j(T)} f\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j}\right) \cdot d(\Delta \text{ЗП}) \right) \quad (10)$$

$$f\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}}}{\Delta \text{ЗП}_j}\right) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j} - M\right)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (11)$$

Следует заметить, что формулировка эффективности применима для случаев, когда речь идет о повышении доходов либо о снижении расходов. Для этих целей в формуле 10 введен множитель $(-1)^m$. Для случая, когда повышение производительности структурной единицы ведет к снижению затрат, т.е. значение коэффициента должно уменьшаться, то $m = 1$. Если же повышение эффективности подразделения связано с увеличением доходов, т.е. значение коэффициента должно увеличиваться, то $m = 0$.

При использовании расходов подразделений в качестве переменных управления и доходов в качестве их переменных состояния и выхода, важно выбрать целевую функцию оптимизации, напрямую зависящую от этих параметров. В данной постановке можно выбирать любую функцию, связанную с расходами или доходами предприятия, его структурных единиц и бизнес-процессов:

$$\Phi = \Phi (P_j, D_k, \Pi_j) \quad (12)$$

Таким образом, в результате проведенных преобразований, имеем следующую постановку задачи управления предприятием:

Найти такие значения затрат по структурным единицам предприятия P_j , которые обеспечат минимум/максимум целевой функции Φ , записанной формулой (12), за счет обеспечения доходов от основных бизнес-процессов D_k , с учетом ограничений, накладываемых взаимосвязями бизнес-процессов и структурных единиц в виде зависимостей (7-11).

Сформулированную задачу будем называть общей задачей *оптимального операционного управления предприятием*, т.к. поиск управляющих воздействий осуществляется в фиксированной матрице процессов и структурных единиц и не предполагает их изменения. Заметим, что детализация расходных статей и также может добавить дополнительные существенно нелинейные компоненты в постановку задачи, в зависимости от конкретной специфики предприятия.

3. Пример построения модели предприятия

Без ограничения общности рассмотрим пример простейшего торгового предприятия размерности 3 бизнес-процессов (см. рис. 9), осуществляемые 4 структурными подразделениями (см. рис. 8).

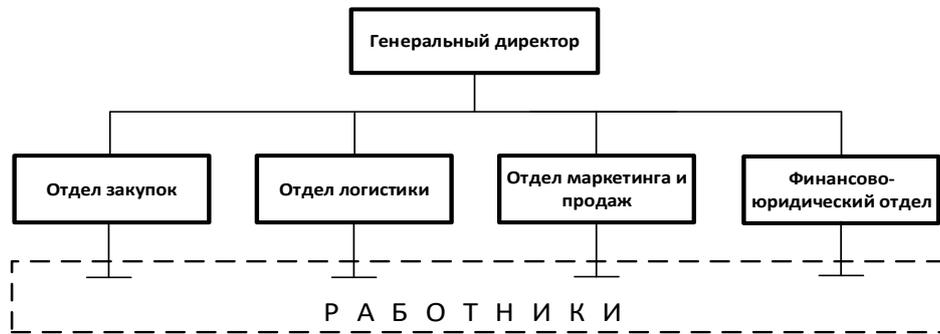


Рис. 8. Орг. штатная структура предприятия тестового примера



Рис. 9. Карта бизнес-процессов предприятия тестового примера

Матрица вовлеченности структурных единиц в бизнес-процессы предприятия определена на основе анализа блок-схем и выглядит следующим образом:

		Стр.единица (j)			
		1	2	3	4
БП (k)		Отдел закупок	Отдел логистики	Отдел маркетинга и продаж	Финансово-юридический отдел
	1	Покупка товара	80%		
2	Логистика	10%	60%	10%	20%
3	Продажа товара			80%	20%

Рис. 10. Матрица вовлеченности предприятия тестового примера

В качестве целевой функции управления выбрана рентабельность всего предприятия:

$$i = \frac{D-P}{P} \rightarrow \max,$$

где доходы определяются бизнес-процессом продажи ($k = 3$), результат которого зависит от деятельности отдела маркетинга и продаж и финансово-юридического отдела ($j = 3$ и $j = 4$ на рис.10):

$$D = D_3 = D_3^{\text{база}} \cdot (\alpha_{33} \cdot K_{\text{персонал}_3} + \alpha_{34} \cdot K_{\text{персонал}_4}) \quad (13)$$

где D_3 – доходы от бизнес-процесса продажи ($k = 3$);

$D_3^{\text{база}}$ – некоторое базовое значение доходов от бизнес-процесса продажи, например, зафиксированное по результатам предыдущего отчетного периода компании;

α_{33}, α_{34} – коэффициенты участия структурных единиц (Π_3 и Π_4 на рис. 10) в бизнес-процессе продаж ($k = 3$);

$K_{\text{персонал}_3}, K_{\text{персонал}_4}$ – коэффициенты эффективности структурных единиц (Π_3 и Π_4).

Прямые расходы определяются затратами на заработную плату по всем структурным единицам и ценой закупки товара:

$$P = \sum_{j=1}^J P_{\text{ФОТ}_j} + P_{\text{закуп}_\text{товара}} = \overline{\text{ЗП}} \cdot \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot \text{Числ}_j + P_{\text{закуп}_\text{товара}} \quad (14)$$

где $P_{\text{ФОТ}_j}$ – расходы на персонал j -го подразделения, $j = 1, \dots, 5$;

$\overline{\text{ЗП}}$ – средняя заработная плата на предприятии с учетом всех налогов и отчислений;

β_j – коэффициент вариативности заработной платы подразделения (во сколько раз средняя зарплата по j -му подразделению отличается от средней зарплаты по всему предприятию);

Числ_j – списочная численность j -го подразделения;

$P_{\text{закуп}_\text{товара}}$ – расходы на закупку товара (процесс $k = 1$), рассчитываемые по формуле

$$P_{\text{закуп}_\text{товара}} = P_1 = P_1^{\text{база}} \cdot (\alpha_{11} \cdot K_{\text{персонал}_1} + \alpha_{14} \cdot K_{\text{персонал}_4}) \quad (15)$$

Дополнительно, в статьи косвенных расходов включены возможные штрафы от потребителя за несвоевременную доставку товара. Штрафы применяются к бизнес-процессу логистики, т.е. $k = 2$:

$$\text{Ш}_{\text{проср}_\text{дост}} = P_2 = P_2^{\text{база}} \cdot \sum_{j=1}^4 \alpha_{2j} \cdot K_{\text{персонал}_j} \quad (16)$$

3.1. Итоговая формулировка задачи оптимального управления предприятием

Максимизировать рентабельность, записанную следующими зависимостями

$$i = \left[\frac{D_3}{(\sum_{j=1}^5 P_{\text{ФОТ}_j} + P_1 + P_2)} - 1 \right] \rightarrow \max$$

$$D_3 = D_3^{\text{база}} \cdot (\alpha_{33} \cdot K_{\text{персонал}_3} + \alpha_{34} \cdot K_{\text{персонал}_4})$$

$$P_1 = P_1^{\text{база}} \cdot (\alpha_{11} \cdot K_{\text{персонал}_1} + \alpha_{14} \cdot K_{\text{персонал}_4})$$

$$P_2 = P_2^{\text{база}} \cdot \sum_{j=1}^4 \alpha_{2j} \cdot K_{\text{персонал}_j}$$

$$K_{\text{персонал}_\text{д}_j} = \left(1 + \int_0^{\frac{P_{\text{ФОТ}_j}}{P_{\text{ФОТ}_j}^{(T-1)}}} f\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j}\right) \cdot d(\Delta \text{ЗП}) \right)$$

$$K_{\text{персонал}_\text{р}_j} = \left(1 - \int_0^{\frac{P_{\text{ФОТ}_j}}{P_{\text{ФОТ}_j}^{(T-1)}}} f\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j}\right) \cdot d(\Delta \text{ЗП}) \right)$$

$$f\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j}\right) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\Delta K_{\text{персонал}_j}}{\Delta \text{ЗП}_j} - M\right)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

$$P_{\text{ФОТ}_j} = \overline{\text{ЗП}} \cdot \beta_j \cdot \text{Числ}_j$$

за счет изменения входных сигналов управления – численности и заработных плат каждого из $j = 1, \dots, 4$ подразделений – Числ_j и β_j , соответственно. Величины $D_3^{\text{база}}$, $R_1^{\text{база}}$, $R_2^{\text{база}}$ являются известными параметрами деятельности предприятия – в частности, в качестве их опорных значений могут выступать финансовые результаты прошлых отчетных периодов компании.

4. Заключение

Предложена методика синтеза математической модели предприятия в терминах классической теории пространства состояний. Полученная нелинейная модель может использоваться для имитационного моделирования сценариев управления предприятием по различным критериям оптимизации. Сформулированы прямые зависимости между экономическими показателями (выходными переменными предприятия как объекта управления) и распределением затрат на функционирование структурных единиц (входными переменными операционного управления предприятием). Проведена полная аналогия с подходами теории оптимального автоматического управления [6, 10], что в будущем позволит применять весь имеющийся в данном разделе знаний математический аппарат для синтеза разнообразных алгоритмов и стратегий управления предприятиями. В частности, на данном этапе исследования уже проведено первичное тестирование модели на чувствительность [23], которое дало нелинейную картину зависимости рентабельности от дифференцированной стратегии управления заработной платой в подразделениях. Пример зависимости рентабельности от регулирования заработной платы в ключевом подразделении (отдел маркетинга и продаж из примера раздела 3 настоящей работы) приведен на рис. 11.



Рис. 11. Пример анализа рентабельности на чувствительность по заработной плате отдела продаж

Как видно из рисунка, управление оплатой труда оказывает существенно нелинейное влияние на экономические показатели предприятия и может дать разный эффект, который напрямую определяется матрицей участия структурных единиц в доходных и расходных бизнес-процессах. Зарплатное стимулирование ключевых подразделений, несмотря на увеличивающиеся затраты, при определенных условиях имеет положительный эффект на рентабельность (см.рис.11, средняя часть графика) за счет более сильной нелинейной связи доходной статьи бизнес-процесса продаж с производительностью соответствующего подразделения. Полный анализ на чувствительность требует дополнительного исследования. Также авторы считают перспективным направление по усовершенствованию предложенной модели за счет обогащения ее разнообразными аппроксимациями производительности персонала, влияния качества нанимаемых на работу специалистов и т.п. В данной работе показан лишь принцип формирования модели управления на базе описанных процессов предприятия, который может быть применен к любой организации. Главным условием применимости подхода является наличие качественного описания карты бизнес-процессов с пошаговыми инструкциями деятельности.

Литература

1. ПНСТ 429-2020. Умное производство: Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. – Предварительный Национальный Стандарт Российской Федерации. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.

2. *Nekrasov I., Schulz T.* Единый цифровой контур решения управленческих задач на энергогенерирующем предприятии // Journal "Rational Enterprise Management", No.2 – Moscow, Russia, 2021. – P.18-21. (http://remmag.ru/upload_data/files/2021-02/GE-TECHNOLINK.pdf – in Russian).
3. *Стрейтс В.* Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления: перевод с английского под ред. Я.З.Цыпкина. – Москва: Наука, 1985. – 295с.
4. *Rolf Findeisen.* Nonlinear Model Predictive Control: A Sampled-Data Feedback Perspective. – Institut für Systemtheorie technischer Prozesse der Universität Stuttgart, 2004. – 135p.
5. *Мееров М.В.* Системы многосвязного регулирования. – Москва: Наука, 1965. – 384 с.
6. *Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В.* Основы теории и элементы систем автоматического регулирования: Учебное пособие для приборостр. спец. ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1985. – 535с.
7. *Каменная М., Громов А., Ферапонтов М., Шматалюк А.* Моделирование бизнеса. Методология ARIS. Практическое руководство. – Москва, 2001. – 333с.
8. *Жаворонков Д.В.* Организационные структуры управления: учебное пособие. – Краснодар: Кубанский Государственный Университет, 2020. – 100с.
9. *Переверзев П.П.* Анализ взаимосвязей бизнес-процессов, организационной структуры и функций информационных систем предприятия на основе матричного исчисления // Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент. – 2015. – Т. 9, № 4. – С.75-88. (С.76).
10. *Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н.* Вариационное исчисление и оптимальное управление: Учебник для ВУЗов / Под ред. В.С.Зарубина, А.П.Крищенко. – 3-е изд., испр. – М: МГТУ, 2006. – 488с.
11. *Маслевич Т.П., Рогожина Н.Н.* Определение ключевых показателей эффективности бизнес-процессов как фактор совершенствования управления современным предприятием // Механизация строительства. – 2015. – № 10(856). – С.51-54.
12. *Сафина Д.М.* Управление ключевыми показателями эффективности: учебное пособие. – Казань: Казанский Университет, 2018. – 123с. (С.20-22).
13. *Измайлов М.К.* Проблемы построения интегрального коэффициента эффективности использования основных фондов промышленного предприятия // Вестник Московского университета имени С.Ю.Витте. Серия 1. Экономика и управление. №2(41) – Москва, 2022. – С.33-40.
14. *Никитина Е. Б., Жуковская С. Л.* Управление затратами и контроллинг: учебное пособие. – Пермь: Пермский Государственный Национальный Университет, 2019. – 129с. (С.8, С.18).
15. *Зарубин В.С.* Математическое моделирование в технике. – М.: МГТУ, 2003. – 496с.
16. *Мицель А.А.* Математическое и имитационное моделирование: Учебн. пособ. – Юрга: ЮТИ, 2016. – 108с.
17. *Прохоров А., Лысачев М.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / Под ред. профессора Боровкова А. – Москва: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401с.
18. *Маслевич Т.П., Рогожина Н.Н.* Практические вопросы внедрения процессного управления и идентификации бизнес-процессов предприятия // Механизация строительства. – 2014. – №9(843). – С.58-61.
19. *Мизиковский И.Е.* Распределение затрат на продажу продукции машиностроительного предприятия методом activity based costing // Вестник ННГУ. Серия: Социальные науки. – 2021. – № 1(61). – С.7-13.
20. *Автухова Е.Э.* Трансфертное ценообразование как инструмент управления компанией // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. – 2021г. – № 2. – С.49-72. (С.60, С.63, С.67, С.69).
21. *Захарова Т.И., Гаврилова С.В.* Мотивация трудовой деятельности: учебно-методический комплекс. – Москва: Издательство ЕАОИ (МЭСИ). – 2008. – 216 с.
22. Ссылка на данные по численности и зарплаты по энергетической отрасли Росстат. (https://rosstat.gov.ru/labor_market_employment_salaries#, https://rosstat.gov.ru/labour_force).
23. *Томович Р., М. Вукобратович.* Общая теория чувствительности. / пер. с сербского Н. В. Логинова, П. В. Надеждина под ред. проф. Я. З. Цыпкина. – Москва: Советское радио, 1972. – 239с.