

УДК 004.94:303.732.4

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ КОНВЕЙЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРАТЕГИЧЕСКОЙ КАРТЫ ЦЕЛЕЙ

Яковлев Д.Д., Петров Д.Ю. (Саратов), Большаков А.А. (Санкт-Петербург)

Введение

При автоматизации производств с использованием технологии Индустрии 4.0 [1, 2] во многих отраслях промышленности получили широкое распространение конвейерные системы. Они обеспечивают автоматическую взаимосвязь основных центров обработки на предприятии. Создание цифровых двойников конвейерных систем существенно снижает риски необоснованных технических решений, что позволяет минимизировать затраты на поиск оптимальных вариантов и широко используется в производстве, логистике и других отраслях [3, 4]. Использование при этом имитационной модели обеспечивает более детальное и полное представление об объектах по сравнению с проведением реального эксперимента.

Конвейерные системы относятся к классу обобщенных динамических систем, которые представляют совокупность взаимосвязанных объектов и процессов, изменяющихся во времени [5]. Для изучения таких сложных объектов применяется системный анализ, который включает совокупность приемов и методов, связанных с предметной областью. Системный анализ включает следующие этапы [6, 7].

1. Постановка задачи управления для решения проблемы, в рамках которой определяются: объект исследования, цели и критерии для изучения объекта и управления им.

2. Определение структуры и границ изучаемой системы.

3. Разработка математической модели изучаемой системы, в рамках которой определяются элементы системы, элементарные воздействия на систему с использованием параметров и задание области определения каждого параметра.

4. Прогнозирование развития системы и исследование математических моделей.

В работе рассматривается предлагаемая методика анализа целей управления автоматизированным производством коробок перемены передач (КПП) на базе сложной конвейерной системы. Объектом исследования в настоящей работе является автоматизированное производство КПП.

Для реализации концепции Индустрии 4.0 на автоматизированных предприятиях для удовлетворения индивидуальных требований потребителей необходимо в режиме, близком к реальному времени, принимать обоснованные решения по управлению функционированием производством. Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

- 1) ускорение адаптации конечной продукции к потребностям потребителя,
- 2) снижение себестоимости продукции при выпуске малых партий продукции;
- 3) уменьшение времени производства продукции;
- 4) снижение времени переналадки производства на выпуск другого вида продукции.

Представить решение общей задачи управления в аналитическом виде на пространстве параметров и характеристик состояний ОУ практически невозможно. Поэтому необходимо провести декомпозицию общей задачи управления на множество взаимосвязанных задач управления, которые могут быть записаны в аналитическом виде. Для этого согласно методике создания системы сбалансированных показателей

[8] автоматизированного производства КПП выделим в дереве целей 4 перспективы: финансы, клиенты, внутренние бизнес-процессы (ВБП), развитие. Такой подход позволил определить основные цели управления производством и ключевые показатели эффективности, представленные в таблице.

Таблица. Цели и показатели производства коробок перемены передач

№	Цель	Перспектива	Показатель 1, наименование в модели	Показатель 2, наименование в модели
1.	Рост прибыли	Финансы	Прибыль, var1_Profit	
2.	Увеличение стоимости компании	Финансы	Стоимость акции, var2_SharePrice	
3.	Увеличение количества клиентов	Финансы	Количество клиентов, var3_NumberOfClients	Количество привлеченных клиентов, var3_NumberOfAttractedClients
4.	Сокращение издержек	Финансы	Издержки на запасы (% от общих издержек), var 4_InventoryCost	
5.	Сохранение клиентской базы	Клиенты	Процент клиентов, обратившихся повторно, var5_RepeatCustomers	
6.	Повышение удовлетворенности клиентов	Клиенты	Процент недовольных клиентов, var6_DissatisfiedCustomers	Увеличение стоимости одной покупки, var 6_IncreaseCost
7.	Привлечение клиентов	Клиенты	Количество привлеченных клиентов, var3_NumberOfAttractedClients	Затраты на привлечение одного клиента, var7_CostCustomerAcquisition
8.	Точное планирование производства	ВБП	Процент заявок о потребностях в деталях, представленных в срок, var8_OrdersOfMaterialsInTime	
9.	Закупка качественных деталей	ВБП	Доля брака, var9_DefectiveMaterials	
10.	Своевременная отгрузка готовых изделий	ВБП	Процент продукции, отгруженной в срок, var10_Shipment	
11.	Оптимизация запасов деталей	ВБП	Процент запасов, запланированных к выдаче, var11_PcDetails	
12.	Уменьшение затрат на управление	ВБП	Экономия затрат на управление, var12_MinControl	
13.	Повышение качества КПП	ВБП	Количество гарантийных случаев, var13_Defects	Процент жалоб клиентов на качество продукции, var13_PcComplaints

№	Цель	Перспектива	Показатель 1, наименование в модели	Показатель 2, наименование в модели
14.	Повышение квалификации сотрудников	Развитие	Количество мероприятий по повышению квалификации, var14_Prof_Events	Процент квалифицированных сотрудников, var14_ProfQualifiedEmployees
15.	Модернизация производства	Развитие	Затраты на модернизацию производства, var15_CostForModernization	Количество мероприятий по модернизации производства, var15_ModernizeProduction
16.	Экономия энергоресурсов	Развитие	Количество мероприятий по экономии энергоресурсов, var16_Energy_Savings	Затраты на экономию энергоресурсов, var16_EnergySavingCosts
17.	Развитие информационной системы	Развитие	Количество внедренных информационных подсистем, var17_ImplementedInformation	Затраты на модернизацию информационной системы, var17_System_upgrade_costs
18.	Уменьшение стоимости процессов	Развитие	Экономия стоимости процессов, var18_ProcessCostSavings	Затраты на модернизацию системы управления, var18_CostOfModernizingSystem

В таблице представлены показатели, связанные с каждой целью, которые определяют ее выполнение. Стратегическая карта целей (СКЦ), разработанная в среде Business Studio (рис. 1), показывает взаимосвязи между различными целями.

В системе Business Studio СКЦ используется для общего мониторинга достижения целей. В процессе работы предприятия, когда получают новые значения показателей из ERP-системы за определенный период, автоматически вычисляются значения оценок степени выполнения целей. Затем эти оценки сравниваются с предельными условиями каждой цели. Если цель не достигнута, то проводится анализ показателей, причем декомпозиция помогает выявить конкретный показатель, вызвавший отклонение. Графики показывают динамику изменения показателей в каждом периоде относительно заданных нормальных и аварийных значений.

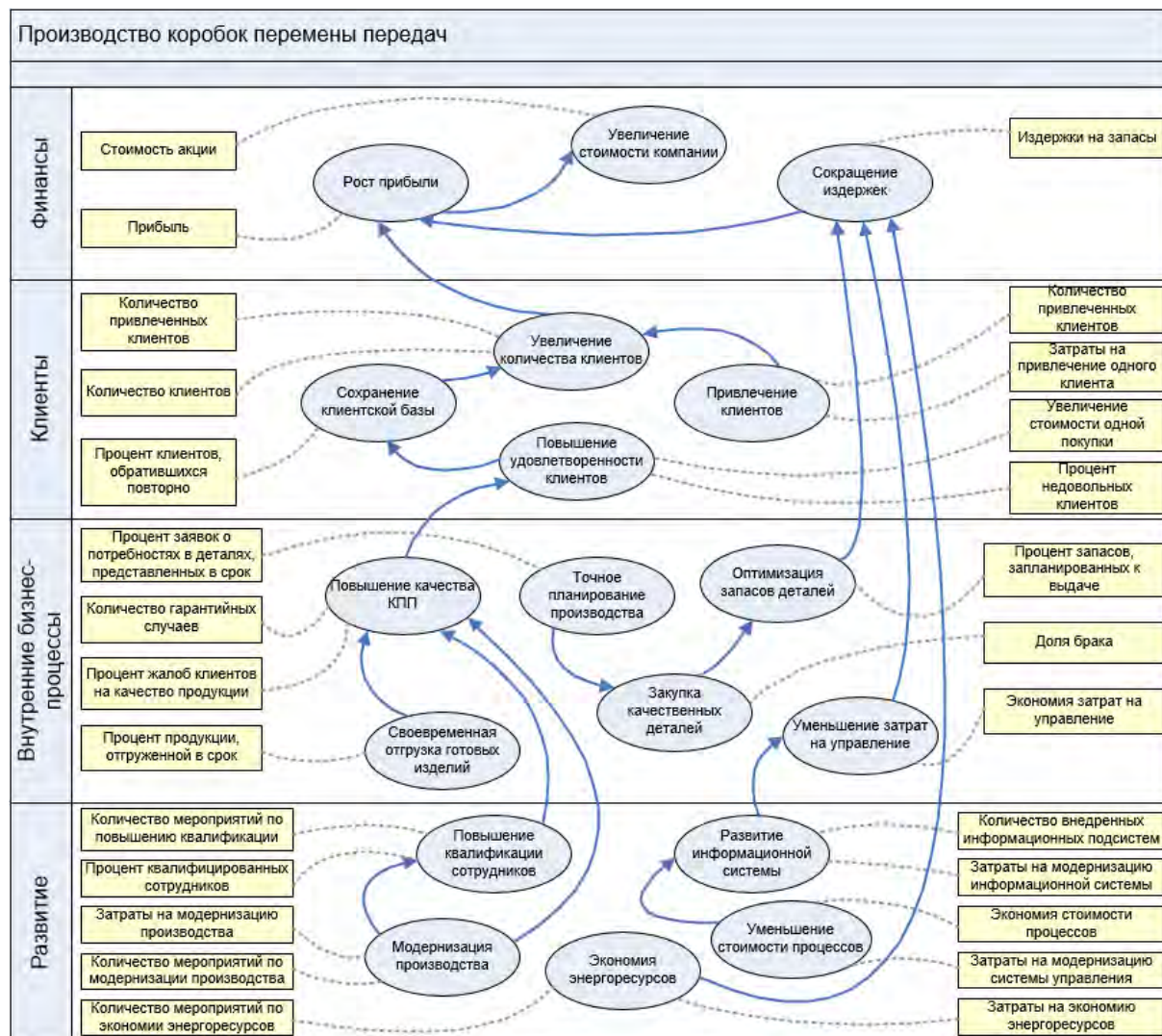


Рис. 1. Стратегическая карта целей производства коробок перемены передач

Традиционно оптимальный баланс между противоречиями «Быстро-Дешево-Качественно» в виде формулировки сбалансированных показателей определяется экспертами [9, 10], однако в сложных системах применение математического моделирования позволяет существенно повысить качество решений, принимаемых экспертами. Для определения допустимых значений нормальных и аварийных границ каждого показателя на основе СКЦ для анализа взаимосвязей показателей разработана структура модели системной динамики в среде имитационного моделирования AnyLogic 8.8.1 Personal Learning Edition [11], показанная на рис. 2.

Структура модели состоит из системы накопителей:

- 1) Перспектива «Финансы» – Finans;
- 2) Перспектива «Клиенты» – Client;
- 3) Перспектива «Внутренние бизнес-процессы» – Details, broken_details, some_product, product_1, product_N;
- 4) Перспектива «Развитие» – Worker.

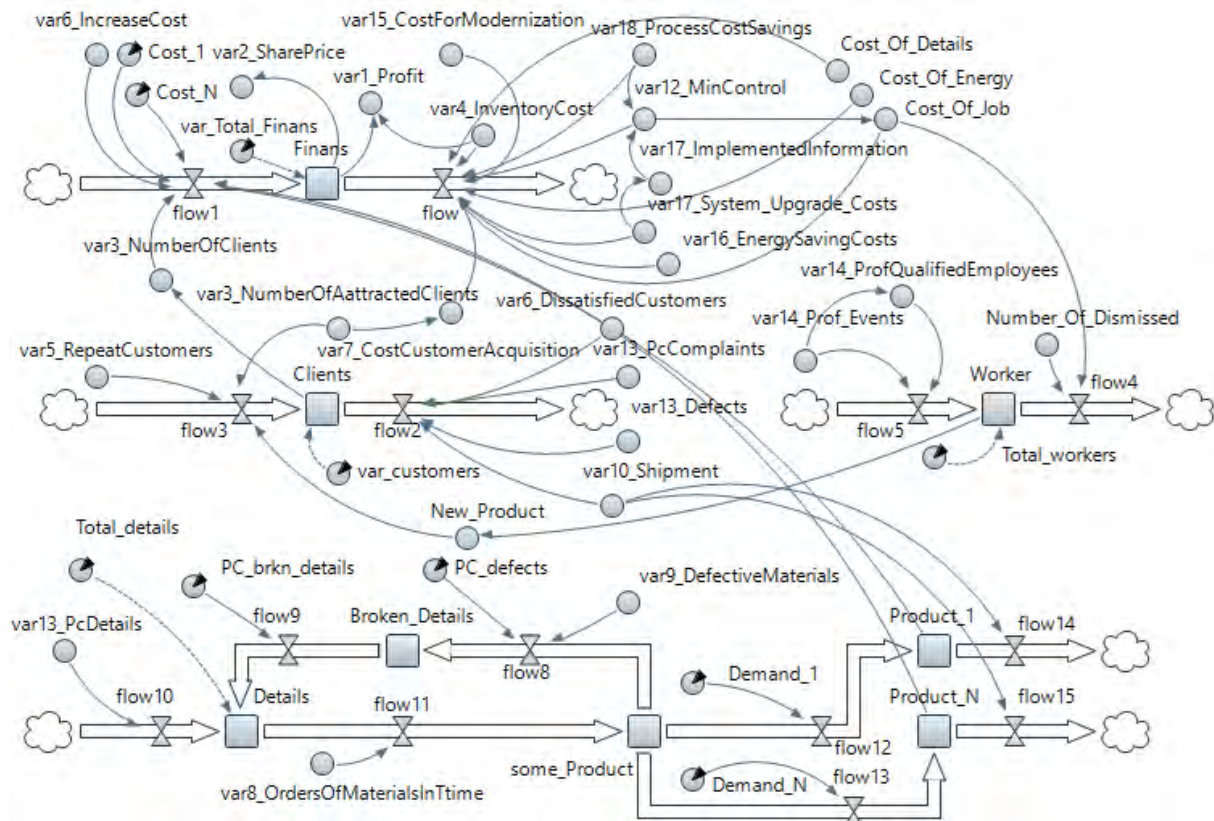


Рис. 2. Структура модели системной динамики

В структуру модели добавлены константы: *demand_1* – спрос на «изделие 1», *demand_N* – спрос на «изделие N», *cost_1* – цена «изделия 1», *cost_N* – цена «изделия N», *PC_brkn_details* – процент бракованных деталей.

Динамические переменные *var1-var18* описаны в вышеприведенной таблице. На основе функций, учитывающих сезонные составляющие, вычисляются динамические переменные: *Cost_Of_Job* – стоимость работ, *Cost_Of_Energy* – стоимость энергии, *Cost_Of_Details* – стоимость материалов.

Вывод

В работе рассмотрены результаты системного анализа производства КПП на базе сложной конвейерной системы. На основе системного анализа определены основные цели и показатели их достижения. В среде Business Studio разработана стратегическая карта целей, которая используется для общего контроля достижения целей. Для определения допустимых значений нормальных и аварийных границ разработана структура модели системной динамики в среде имитационного моделирования AnyLogic, которая позволяет существенно повысить качество принятия решений экспертами при создании системы сбалансированных показателей. Модель системной динамики функционирования производства КПП в среде AnyLogic позволяет оптимизировать расходы на проведение мероприятий и определять значения параметров модели для минимизации или максимизации значения целевого функционала.

Работа выполнена в ИПТМУ РАН по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFNM-

2022-0010 «Разработка интеллектуальных моделей и методов управления сложными человеко-машинными системами в условиях критических ситуаций»).

Литература

1. **Hussein M. E., José C.** A Review of Industry 4.0 Maturity Models: Adoption of SMEs in The Manufacturing and Logistics Sectors // *Procedia Computer Science*. – 2023. – Vol. 219. – P. 236-243. ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.286>
2. **Korchagin A., Deniskin Y., Pochbneva I., Vasilyeva O.** Lean Maintenance 4.0: implementation for aviation industry // *Transportation Research Procedia*. – 2022. – Vol. 63. – Pp. 1521-1533. ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>
3. **Qiu, H., Chen, Y., Zhang, H. et al.** Evolutionary digital twin model with an agent-based discrete-event simulation method. *Appl Intell* 53, 6178–6194, Springer (2023). <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03507-2>
4. **Tao F. et al.** Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop // *Computer Integrated Manufacturing Systems*. – 2017. – Vol. 23, 1. – Pp. 1-9.
5. **Петров Д.Ю.** Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства/ Д.Ю. Петров // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2021. – № 57. – С. 98-104.
6. Проектирование интеллектуальной информационной системы для анализа и прогнозирования динамики рисков конкурентоспособности регионов РФ / И.В. Вешнева, Г.Ю. Чернышова, А.А. Большаков // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2021. – № – 56. – С. 81-88.
7. Application of system analysis for technological processes investigation / Polyakova M., Shiriaeva E., Iansaitova M. // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Т. 834 КЕМ. – С. 24-31.
8. **Давыденко Е.А.** Эволюция концепции сбалансированной системы показателей: от истоков к цифровому предприятию // *Российское предпринимательство*. 2018. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-kontseptsii-sbalansirovannoy-sistemy-pokazateley-ot-istokov-k-tsifrovomu-predpriyatiyu> (дата обращения: 06.09.2023).
9. **Табачникас Б.И.** Система сбалансированных показателей: роль в управлении предприятием, пути совершенствования / Б.И. Табачникас // *Проблемы современной экономики*. – 2006. – № 3/4 (19/20).
10. Сайт компании «Современные технологии управления» [Электронный ресурс]: Система сбалансированных показателей. – URL: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/bsc/theory> (дата обращения 18.09.2023).
11. Сайт компании AnyLogic [Электронный ресурс]: Системная динамика. – URL: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/system-dynamics/> (дата обращения 22.08.2023).