

Модель процессов устойчивого развития для цифрового двойника сельскохозяйственного производства

Г. С. Смирнова¹, Р. А. Сабитов¹, Р. Т. Сиразетдинов¹, А. В. Епонешников², Ш. Р. Сабитов³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

²Университет Иннополис, г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

Аннотация. Предложен подход к построению модели цифрового двойника сельскохозяйственного производства на основе принципа устойчивого развития экономики, гармонично сочетающий два взаимосвязанных процесса: устойчивость и развитие. Рассмотрена структурно-математическая модель устойчивого развития, основанная на так называемой модели типового производственного агрегата. Она представляет собой систему алгебраических равенств и неравенств, оценивающих мощности отдельных составляющих процесса и опирающихся на балансовые соотношения. В рамках предложенной модели можно рассматривать устойчивое развитие экономики отдельных сельскохозяйственных районов, исследуя обе составляющие экономики района и добиваясь их гармоничного взаимодействия. Рассмотренные модели, настроенные на конкретное сельскохозяйственное производство в онлайн-режиме, могут стать основой его цифровизации и служить инструментом для обеспечения эффективности и непрерывного устойчивого развития.

Ключевые слова: цифровой двойник, идентификация, устойчивое развитие, динамические модели производства, Индустрия 4.0, прогнозирование, сельскохозяйственное производство.

DOI 10.14357/20718632210409

Введение

Наращение проблем, которые связаны с непредсказуемым возникновением глобальных кризисных процессов и ситуаций, несоответствиями между отраслями отечественной экономики и возникающими цифровыми преобразованиями в большинстве сфер деятельности, актуализируют поиск действенных решений по стратегическому управлению процессом цифрового преобразования в любой организации, в том числе в крупных и средних компаниях агробизнеса. Следует отметить, что в современ-

ном мире устойчивое развитие сельскохозяйственных предприятий базируется на применении цифровых технологий. Однако в условиях цифровой экономики элементы механизма процесса цифровой трансформации в сельскохозяйственных организациях остаются не до конца определёнными, постоянными являются только комплекс факторов, определяющих объективную необходимость цифровизации, а именно: обеспечение продовольственной безопасности страны путем значительного повышения урожайности и производительности труда, снижение материальных затрат, защита окружающей среды и так далее.

На сегодняшний день при переходе экономики на систему управления, которая основывается на применении больших массивов данных, формируемых цифровыми технологиями, актуальным становится вопрос о пересмотре целевых установок, принципов, механизмов и инструментов модернизации в сельскохозяйственной отрасли, так как сложившаяся на данный момент практика проведения цифрового преобразования не способствует технологическому рывку в исследуемой отрасли. Быстрое и повсеместное внедрение цифровизации, как естественная закономерность функционирования экономических систем в современном мире, предполагает концептуально-методологическое обоснование процесса реализации цифровизации при принятии во внимание особенностей перехода к цифровой экономике в сельскохозяйственной отрасли и установлении степени готовности крупных и средних компаний сферы агробизнеса и системы отраслевого управления к цифровой трансформации [1-3].

Как известно, одним из ключевых направлений цифровизации является применение цифрового двойника [4], в основе которого лежит моделирование производственного процесса в реальном режиме времени [5]. В данной работе предложены подходы к применению математических моделей сельскохозяйственного производства для построения цифрового двойника производственного процесса, отражающего в онлайн-режиме основные процессы устойчивого развития производства и позволяющего наглядно представлять состояние производственного процесса и оперативно принимать стратегические управленческие решения.

Сельскохозяйственное производство в модели устойчивого развития региона

Проблема устойчивого развития [6, 7] регионов связана с обеспечением двух параллельных процессов, проходящих в регионе — это процесс *развития* и процесс обеспечения *устойчивости* [8, 9]. Развитие тесно связано с расширением производства, рынков сбыта, кооперацией с внешними поставщиками и покупателями. Однако это приводит к опасности, рискам, связанным с внешними для региона факторами, и поэтому

слабо контролируемые со стороны региона. Устойчивость же определяется степенью независимости экономики от внешних факторов. Поэтому, чем меньше экономика связана с внешними поставщиками и потребителями, чем сильнее она «завязана» на внутренний рынок, тем она более устойчива. Однако в этом случае развитие экономики ограничено объемами внутреннего рынка и в некоторый момент прекращается. Отсюда следует вывод, что для устойчивого развития экономики региона необходимо гармонично сочетать оба эти процесса. Для своего развития регион должен расширять внешние связи, искать свою нишу на внешних рынках, специализироваться на них. Однако в случае кризиса, прекращения поставок извне сырья, комплектующих, закрытии рынков сбыта и других неблагоприятных обстоятельствах, в регионе должна остаться часть экономики, замкнутой на саму себя, пользующейся собственными ресурсами и работающей на своих внутрирегиональных потребителей. Только в этом случае можно говорить об устойчивом развитии региона.

Устойчивое развитие региона тесно связано с его экономической безопасностью. Как известно, продовольственная безопасность является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности страны [10]. Поэтому производство сельскохозяйственной продукции играет немаловажную роль в устойчивом развитии региона. При этом можно рассматривать устойчивое развитие отрасли сельского хозяйства как самостоятельную проблему в рамках экономической безопасности региона. Производство сельскохозяйственной продукции естественным образом содержит в себе обе составляющие процесса устойчивого развития. В первую очередь, это производство продукции для внутреннего потребления - потребление продуктов сельского хозяйства самим населением региона - этот процесс вносит определенный вклад в экономическую устойчивость региона. А кроме этого, сельскохозяйственная отрасль производит продукцию и для внешнего потребителя — это и зерно, и молочная продукция, и другие виды продукции, поставляемые внешним потребителям. А развитие отрасли в направлении внешних по отношению к региону рынков, его специализация, работает на усиление экономической мощи региона в целом.

В рамках предложенной в данной работе модели устойчивого развития следует отметить, что сельскохозяйственная отрасль имеет достаточно развитую часть обеспечения устойчивости, так как большей частью она использует собственные ресурсы (землю, водоемы и т.п.) и работает на внутреннее потребление, что дает определенную независимость от внерегиональных факторов. При этом существует и составляющая, связанная с внешними рынками и позволяющая отрасли активно развиваться.

Математическая модель сельскохозяйственного производства как типового производственного агрегата (ТПА)

В основу моделирования сельскохозяйственного производства положена методология, основанная на понятиях мощности сложных систем, динамики экономического объекта, типового производственного агрегата (ТПА), как структурно-математической модели бизнес-процессов [11-17]. Когда говорится о каком-либо процессе, то, как правило, у него имеется *вход*, через который что-то попадает в процесс, и, после обработки, на *выходе* получается результат выполнения процесса. Однако, кроме этого, в процессе участвуют основные средства, т.е. *оборудование*, с помощью которого осуществляется процесс, а также *кадровый состав*, участвующий в осуществлении процесса. Важную роль играют *информационная и интеллектуальная* составляющие, которые, в случае производственного процесса, представляют собой технологию, технический регламент, наличие лицензий, нематериальные активы и т.п. Структурная часть модели ТПА (Рис. 1) близка к моделям бизнес-процессов методологии SADT, в том числе стандарта IDEF0 [18]. Однако ТПА, кроме структурной составляющей, содержит и математическую модель.

В дальнейшем модели ТПА будем рассматривать применительно к сельскохозяйственному производству, который будем называть сельскохозяйственным производственным объектом (СПО). К сельскохозяйственным производственным объектам могут относиться как отдельные сельскохозяйственные производства, фермерские хозяйства, так и сельское хо-

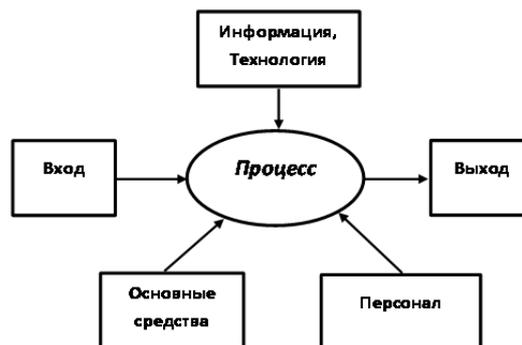


Рис. 1. Типовой производственный агрегат

зяйство района или региона, и даже агропромышленный комплекс в целом.

Пусть некоторый СПО, выпускает n видов продукции, включая и промежуточную продукцию, объемы выпуска которой за заданный интервал времени обозначим вектор-столбцом $X=(x_1, \dots, x_n)^T$. Часть этой продукции используется для внутреннего потребления. Для описания процессов потребления применим модели межотраслевого баланса В.Леонтьева (МОБ) [19]. Введем квадратную $n \times n$ -матрицу A_x , определяющую нормы расходов на внутреннее потребление, которая называется матрицей коэффициентов прямых затрат продукции.

Введем в рассмотрение m -мерный вектор-столбец $Y=(y_1, \dots, y_m)^T$, компоненты которого представляют собой объемы продуктов или услуг, предоставляемых СПО внешним потребителям. Здесь, в отличие от моделей МОБ, номенклатуры внешнего продукта Y и внутреннего X различаются, но производство внешнего продукта основано на внутреннем продукте, и количество внутреннего продукта, необходимого для производства выходной продукции равно величине $A_y Y$, где A_y - $n \times m$ -матрица норм расхода внутреннего продукта на единицу выходного продукта. В частном случае, когда вектора X и Y совпадают, A_y является единичной матрицей.

Объем производимой внутренней продукции X связан с объемом выходной продукции Y выражением, аналогичным уравнению МОБ:

$$(E - A_x) X = A_y Y, \quad (1)$$

где E - n -мерная единичная матрица. Выражение (1) в рамках структуры ТПА представляет собой математическую модель блока производственного процесса СПО.

Рассмотрим остальные блоки ТПА (Рис. 1).

Блок «Выход» в структуре ТПА характеризует результат выполнения процесса и определяет требования ко всем остальным блокам производственного процесса. Выход определяет характеристики выпускаемой продукции. Он содержит как фактическую информацию о выпуске, так и требуемые характеристики выпускаемой продукции. Это объемы выпуска, рыночные цены, сроки выполнения заказа и т.п. Они тянут за собой требования к остальным блокам производственного агрегата. Тогда, задав некоторые требуемые значения выпускаемой продукции $Y=Y_{\text{тр}}$, можно на основании выражения (1) определить требования к объемам выпуска внутреннего продукта $X_{\text{тр}}$.

Блок «Вход» представляет собой процесс организации поставки сырья, материалов, комплектующих, поступающих извне. К нему относятся, например, процессы закупок, происходящие в подразделениях снабжения. Стабильность этого блока существенно влияет на устойчивость СПО.

Введем g -мерный вектор столбец $V=(v_1, \dots, v_r)^T$ объемов продуктов, поступающих извне. Потребность в этих продуктах связана с вектором X с помощью $g \times n$ -матрицы норм расходов A_v :

$$V = A_v X. \quad (2)$$

Компоненты входного вектора, как правило, имеют ограничения и описываются системой неравенств вида:

$$0 < V < V^*, \quad (3)$$

где V^* – вектор максимально возможных объемов входных продуктов за рассматриваемый интервал времени. Выражение вида (3) определяет некоторое множество возможных объемов входных продуктов, которое в дальнейшем назовем мощностью входа системы.

Блок «Основные средства» характеризует производственные мощности СПО, которые определяются наличием того или иного оборудования. Пусть на предприятии имеется q типов оборудования. Производительность оборудования и их количество напрямую определяют возможности производства той или иной компоненты вектора X . Введем в рассмотрение вектор $K=(K_1, \dots, K_q)^T$, компоненты которого соответствуют количеству единиц действующего оборудования каждого типа. Предполагается, что каждый тип оборудования может про-

изводить несколько видов продукции. Возможности каждой единицы оборудования, т.е. мощность единицы оборудования, описывается неравенством следующего вида:

$$0 < a_{i1} x_1 + \dots + a_{in} x_n < I, \quad i=1, \dots, q, \quad (4)$$

Здесь коэффициенты a_{ij} связаны с производительностью i -го оборудования по j -му виду продукции. Тогда мощность оборудования, как множество всех возможных вариантов производства продукции X , определяется следующей системой равенств и неравенств:

$$0 < a_{i1} x_{1i} + \dots + a_{in} x_{ni} < K_i, \quad i=1, \dots, q, \quad (5)$$

$$x_j = x_{j1} + \dots + x_{jq}, \quad j=1, \dots, n,$$

где первый индекс переменной x_{ji} соответствует номеру компоненты продукции, а второй индекс – номеру типа оборудования, на котором он производится.

Блок «Персонал» содержит математические модели мощности персонала СПО. Мощность персонала, т.е. мощность СПО по персоналу, представляет собой множество всех возможностей производства продукции, ограничиваемое наличием и количеством персонала той или иной квалификации. Пусть l – количество видов квалификаций персонала, участвующего в производственном процессе. Введем в рассмотрение вектор $L=(L_1, \dots, L_l)^T$, компоненты которого соответствуют количеству работников той или иной квалификации. Тогда, введя в рассмотрение коэффициенты p_{ij} , характеризующие производительность специалиста i -й квалификации по производству j -го вида продукции, по аналогии с мощностью оборудования, получим выражение для мощности персонала СПО:

$$0 < p_{i1} x_{1i} + \dots + p_{in} x_{ni} < L_i, \quad i=1, \dots, l, \quad (6)$$

$$x_j = x_{j1} + \dots + x_{jq}, \quad j=1, \dots, n,$$

где первый индекс переменной x_{ji} соответствует номеру компоненты продукции, а второй индекс – номеру вида квалификации персонала.

Блок «Информация-Технологии» осуществляет взаимную увязку всех процессов предприятия на основе основных производственных технологий, методов и структуры управления. Этот блок определяет технологию производства, наличие документации, наличие прав на тот или иной вид деятельности, разрешение на выполнение тех или иных видов работ и т.п. Поэтому он определяет структуру матриц, значения коэффициентов, входящих в рассмот-

ренные выше формулы. Влияние этого блока на производственную деятельность осуществляется через производительность, определяемую наличием той или иной технологии, совершенством системы управления, а также наличием или отсутствием патентов и лицензий на те или иные технологии и виды деятельности.

Таким образом, выражения (1) - (6) представляют собой математическую модель процесса производства СПО.

В предложенной математической модели должны быть заданы типы имеющегося оборудования, виды квалификации специалистов, коэффициенты их мощностей, а также соответствующие матрицы коэффициентов затрат A_y , A_p , A_x . Задавая вектора количества оборудования K и персонала L , а также ограничения по входу V^* , получаем мощность системы Ω_y , представляющую собой, в конечном счете, множество всех возможных выходных векторов $Y \in \Omega_y$ при наличии соответствующего оборудования, персонала и возможностей внешнего снабжения. Задав некоторый вектор $Y = Y_{тр}$, соответствующий потребностям внешнего рынка, можно определить, достаточно ли мощности для производства объема продукции $Y_{тр}$ при наличии оборудования K и персонала L и ограничениях по внешним ресурсам V^* . Если мощностей недостаточно, то модель позволяет определить необходимое количество оборудования и персонала, которое необходимо добавить для обеспечения выполнения производства $Y_{тр}$.

Пример построения модели устойчивого развития для сельскохозяйственной производственной системы

Рассмотрим в качестве иллюстративного примера некоторую животноводческую ферму, на которой разводится крупнорогатый скот (КРС) и производится мясо и молоко.

Допустим на ферме имеется $K_{кор}$ голов КРС – коров.

Обозначим объем годового производства мяса $X_{мяс}$ и молока $X_{мол}$.

На ферме в год рождается X_T телят, из которых часть в количестве $\Delta K_{кор}$ идет на ремонт стада, остальная часть либо реализуется, либо

идет на откорм в количестве X_B для производства мяса.

Очевидно, что

$$X_B < X_T - \Delta K_{кор}. \quad (7)$$

В дальнейшем для простоты воспользуемся среднестатистическими данными:

1) среднегодовой удой молока с одной коровы равен 3,5 т, т.е. годовое производство молока, в тоннах в год, определяется выражением:

$$X_{мол} = 3,5 K_{кор}, \quad (8)$$

2) в год корова рождает одного теленка, т.е. $X_T = K_{кор}$,

3) ремонтное количество телят, с учетом падежа, определяется как 20% от размера стада, т.е.

$$X_T^p = 0,2 K_{кор} = 0,2 X_T, \quad (9)$$

4) ежегодно из стада выбывает также 20% коров, которые идут на производство мяса. Из одной зрелой коровы выходит 300 кг мяса, и всего за счет ремонта производится мясо в количестве:

$$X_{мяс}^p = 0,06 K_{кор}, \text{ тонн в год.} \quad (10)$$

5) выход мяса с откормленного бычка составляет 200 кг, тогда годовое производство мяса определяется выражением:

$$X_{мяс}^b = 0,2 X_B, \text{ тонн в год.} \quad (11)$$

Итого, ежегодное производство мяса (в тоннах) определяется выражением:

$$X_{мяс} = X_{мяс}^p + X_{мяс}^b = 0,06 K_{кор} + 0,2 X_B \quad (12)$$

Рассмотрим трудовые затраты. Здесь не будем подробно расписывать структуру трудовых затрат, а лишь примем, что имеются условно переменные затраты, пропорциональные количеству коров, телят, бычков на ферме, и условно постоянные, не зависящие от состава стада, связанные с работами, не зависящими, в определенных пределах, от количества КРС на ферме, например, необходимо содержать тракториста, механика, ветеринара, сторожа и т.п. Трудовые затраты, как суммарное количество штатных единиц, требуемых на ферме, определяются выражением:

$$L = T_{кор} K_{кор} + T_T X_T + T_B X_B + L_0, \quad (13)$$

где примем $T_{кор} = 0,07$, $T_T = 0,05$, $T_B = 0,05$ человек (штатных единиц), приходящихся на одну голову КРС, $L_0 = 10$ человек, что соответствует трудовым затратам некоторой небольшой среднестатистической фермы.

В дальнейшем предполагается, что часть заработной платы работников выдается мясом и

молоком, производимым на этой же ферме, причем в количестве, определяемом нормами потребления РФ для всех членов семьи работника. Каждый работник имеет семью. Среднее количество человек в семье k_c для России составляет 3-4 человека, примем $k_c = 4$.

Тогда количество человек, которые должны питаться продукцией фермы равно $k_c L$. Остальное, что производится на ферме – это внешний продукт, идущий на продажу. В соответствии с нормами, каждый человек потребляет $a_{\text{мяс}} = 0,075$ т мяса (75 кг) и $a_{\text{мол}} = 0,34$ т молока (340 кг) в год. Тогда годовое потребление населением фермы собственной продукции определяется выражениями:

$$X_{\text{мяс}}^L = a_{\text{мяс}} L \text{ тонн мяса в год} \quad (14)$$

и

$$X_{\text{мол}}^L = a_{\text{мол}} L \text{ тонн молока в год.} \quad (15)$$

Отсюда, система уравнений, описывающая производство молока и мяса на ферме, имеет следующий вид:

$$[3,5 - a_{\text{мол}} (T_{\text{кор}} + T_{\text{т}})] K_{\text{кор}} - a_{\text{мол}} T_{\text{б}} X_{\text{б}} = a_{\text{мол}} L_0 + Y_{\text{мол}}, \quad (16)$$

$$[0,06 - a_{\text{мяс}} (T_{\text{кор}} + T_{\text{т}})] K_{\text{кор}} - (0,2 - a_{\text{мяс}} T_{\text{б}}) X_{\text{б}} = a_{\text{мяс}} L_0 + Y_{\text{мяс}},$$

где $Y_{\text{мол}}$ – годовая программа производства молока,

$Y_{\text{мяс}}$ – годовая программа производства мяса.

Эта модель позволяет решать как прямую, так и обратную задачи. К прямой задаче относится определение количества мяса и молока, производимого фермой при заданном количестве дойных коров и бычков на откорме. Некоторые результаты расчетов приведены в Табл. 1. Так, например, стадо в 100 коров, при максимальном количестве бычков на откорме, т.е. при $K_{\text{кор}} = 100$ голов и $X_{\text{б}} = 80$ голов, дает 20,0 тонн мяса и 341,2 тонн молока в год.

Заметим, что в первой строчке Табл. 1, при количестве дойных коров $K_{\text{кор}} = 3$ и количестве бычков $X_{\text{б}} = 3$, выход мяса $Y_{\text{мяс}} = 0$. Это означает, что такое количество животных дает возможность обеспечить мясом только работников фермы, и мяса на продажу не остается, хотя молоко на продажу производится.

Обратная задача заключается в определении необходимого размера стада, количества дойных коров и бычков на откорме, которые обеспечили бы требуемое количество молока

Табл. 1. Результаты расчетов (прямая задача)

№ п/п	$K_{\text{кор}}$, гол.	$X_{\text{б}}$, гол.	$Y_{\text{мол}}$, т/год	$Y_{\text{мяс}}$, т/год
1	3	3	6,9	0
2	4	3	10,4	0,04
3	10	8	31	1,3
4	20	16	65,5	3,4
5	30	24	100	5,5
6	50	40	169	9,7
7	100	80	341	20
8	200	160	686	41
9	400	320	1375	62

Табл. 2. Результаты расчетов (обратная задача)

№ п/п	$Y_{\text{мол}}$, т/год	$Y_{\text{мяс}}$, т/год	$K_{\text{кор}}$, гол.	$X_{\text{б}}$, гол.
1	10	0	3,85 (4)	2,8 (3)
2	50	0	15,4 (4)	0
3	100	5	30	21,5 (22)
4	400	20	117	75,3 (75)
5	400	25	117	100,7 (101)
6	400	40	117,5 (118)	177,1 (177)

$Y_{\text{мол}}$ и мяса $Y_{\text{мяс}}$, выставляемого на рынок. Некоторые результаты расчетов приведены в Табл. 2. Так как результаты расчетов получаются дробными, в скобках приведены значения размеров стада, округленные до целых чисел.

На Рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов необходимого количества дойных коров $K_{\text{кор}}$ и бычков на откорме $X_{\text{б}}$ (ось ординат), для обеспечения различного количества надоев молока $Y_{\text{мол}}$ (ось абсцисс), при условии, что мясо на продажу не производится, т.е. $Y_{\text{мяс}} = 0$. На Рис. 2 рассмотрен вариант, когда на ферме имеется $L_0 = 10$ постоянных работников. На Рис. 3 рассмотрен вариант, когда на ферме имеется $L_0 = 20$ постоянных работников.

Из графиков видно, что, несмотря на то, что продажа мяса не предусмотрена, его необходимо производить для обеспечения населения фермы. При этом, в первом случае, когда $L_0 = 10$ чел., если молока производится менее 7 тонн в год, то количество бычков требуется больше, чем имеется в наличии коров. А во втором случае, когда $L_0 = 20$ чел., количество бычков требуется больше, чем имеется коров, при спросе на молоко уже менее 13 тонн в год.

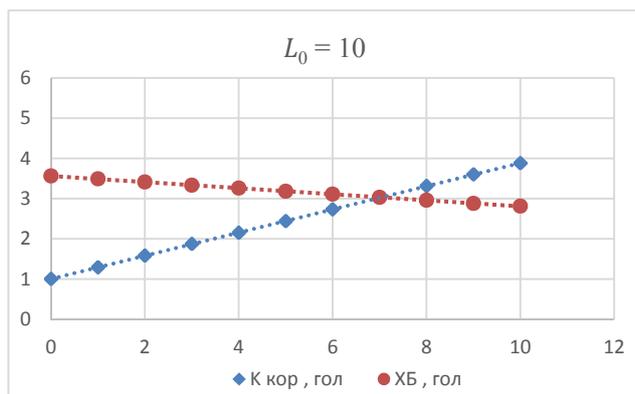


Рис. 2. Результаты расчета: $L_0 = 10$ постоянных работников

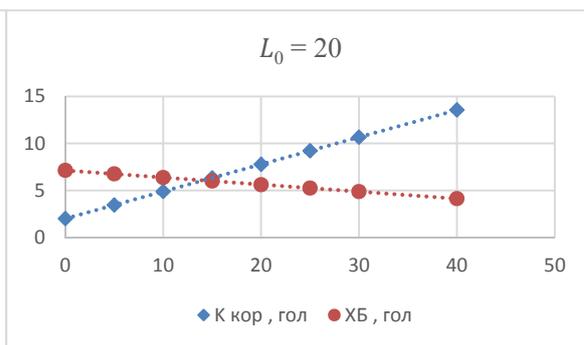


Рис. 3. Результаты расчета: $L_0 = 20$ постоянных работников

Таким образом, в данном расчетном примере выражение (16) представляет собой статическую математическую модель производственного процесса мясо-молочной фермы, когда часть производимой продукции распределяется между самими работниками. Здесь специально не рассмотрена финансовая сторона работы фермы, которая связана с рыночными ценами на продукцию и на сырье. Здесь иллюстрируется моделирование замкнутой части производственного процесса, когда часть продукции используется на внутренние нужды. Тогда, при отсутствии спроса на продукцию, ферма продолжает работать, обеспечивая потребности собственных работников и, тем самым, обеспечивая свою устойчивость.

Как известно, большую часть затрат в мясо-молочном производстве составляют корма. Поэтому в данную модель можно включить также и производство кормов, и, соответственно, оплату труда заготовителей кормов продуктами, производимыми на ферме. Тем самым, мы еще расширим и усилим устойчивую составляющую фермы, как производственной системы.

Заключение

Данная модель позволяет моделировать постепенную трансформацию СПО в следующих направлениях.

Во-первых, как показано выше, моделируется развитие и расширение производства, определяется его структура, необходимая для обеспечения выпуска новых объемов, либо новых видов продукции. При этом, это можно

осуществлять как за счет прежних технологий, например, увеличивая количество оборудования уже имеющегося вида, а можно приобретать и запускать новые виды оборудования, новые технологии, что скажется на размерах и величинах соответствующих матриц и коэффициентов модели.

Во-вторых, можно моделировать локализацию производства, что заключается в уменьшении размерности вектора V продукции, получаемой извне, и расширении вектора X внутренней продукции. Это опять ведет к приобретению нового оборудования, принятию нового персонала, т.е. изменению структуры и размерностей модели. Фактически, это добавляет устойчивость производства, дает новые рабочие места.

В-третьих, изменяя матрицу A_y , можно варьировать соотношением, сколько продукции оставлять для внутреннего потребления, а сколько отправлять на внешний рынок. Тем самым, управлять степенью устойчивости предприятия и его развитием.

В общем случае, в рамках предложенной модели устойчивого развития, можно рассматривать не только сельское хозяйство, а весь агропромышленный комплекс региона в целом. С другой стороны, в рамках данной модели можно рассматривать также устойчивое развитие отдельных районов, исследуя обе составляющие экономики района и добиваясь их гармоничного взаимодействия. Предложенная модель также позволяет рассматривать устойчивое развитие отдельных населенных пунктов, например, сельских поселений, опирающихся на местные фермерские и личные хозяйства,

а также отдельные сельскохозяйственные производства. В каждом случае необходимо обеспечить гармоничное сочетание устойчивости, самодостаточности, по крайней мере, продовольственной независимости хозяйств и возможности их развития.

Литература

1. Методология развития экономики, промышленности и сферы услуг в условиях цифровизации / под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 48-90.
2. Hess, et.al., Options for Formulating a Digital Transformation Strategy; MIS Quarterly Executive, 2016, Vol 15 No. 2, p. 123-139
3. Китова О.В., Брускин С.Н. Цифровая трансформация бизнеса// Журнал «Цифровая экономика». - 2018. - №1 - С. 20-25.
4. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 7, no.5, 2019. - С.105-114.
5. Ершов К.В., Кушарев А.А., Сиразетдинов Р.Т. Виртуальное предприятие по реализации ремонтных технологий на технологическом оборудовании. - Изв. вузов "Авиационная техника". Казань, 2005, N 4, с.54-56.
6. Коптюг В. А., Матросов В. М., Левашов В. К., Демянко Ю. Г.. Подходы к разработке национальной стратегии устойчивого развития России//Химия в интересах устойчивого развития. – 2001 – №9. – С.493-502.
7. Сиразетдинов Р.Т. Моделирование устойчивого развития предприятия. Труды XI Международной Четаевской конференции. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ.– 2017. – С.192-200.
8. R. T. Sirazetdinov, A. V. Samodurov, A. N. Khusnutdinov, E. N. Tarchinskaya. Sustainable Development of Manufacturing Enterprises Based on Structural, Infological and Dynamic Modeling. 10-th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. 12-14 October 2016, Baku, Azerbaijan.
9. Указ Президента РФ от 21.01.2020 N 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации», № 20 // Информ.- прав. система «КонсультантПлюс». Версия от 01.03.2020 г.
10. Сиразетдинов Р.Т. Математическое моделирование мощности инфраструктуры сложных систем. // Известия академии наук. Теория и системы управления, 1998. N 3, С.96-104.
11. Gulnara S. Smirnova, Rustem A. Sabitov , Ekaterina A. Korobkova, Shamil R. Sabitov Modeling production facility as a dynamic integrated interacting objects system // Procedia Computer Science . 2017 №112, 965–970
12. Сиразетдинов Т.К. Динамическая модель прогнозирования и оптимальное управление экономическим объектом// Изв. ВУЗов. Авиационная техника, 1972, №4. С.32-38.
13. Сиразетдинов Т.К. Динамическое моделирование экономических объектов // Фэн, 1996.
14. Сиразетдинов Т.К., Родионов В.В., Сиразетдинов Р.Т. Динамическое моделирование экономики региона. Фэн, Академия Наук РТ, 2005.
15. Сиразетдинов Р.Т., Бражкина А.А. Универсальная структурная модель типового экономического кластера // Управление большими системами. Выпуск 29. М.: ИПУ РАН, 2010. С.152-166.
16. Сиразетдинов Р.Т. Математические модели риска в кризисных ситуациях // Вестник НЦБЖД. - 2018. - № 4 (38) - С 129-134.
17. Сиразетдинов Р.Т. Ризаев З.И. Алгоритмы оценки выполнимости проекта и распределения заданий на основе математического моделирования компетенций работников. Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 5. С. 317-321.
18. ГОСТ Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.
19. Эйдельман М.Р. Межотраслевой баланс общественного продукта (Теория и практика его составления). — М.: Статистика, 1966. — 375 с.

Смирнова Гульнара Сергеевна. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», институт компьютерных технологий и защиты информации, кафедра динамики процессов и управления, г. Казань. Зав. лабораторией, доцент, кандидат технических наук. Количество печатных работ: более 100 (в т.ч. 2 монографии). Область научных интересов: математическое моделирование, информационные системы и технологии, интеллектуальные системы управления, цифровое производство. E-mail: seyl@mail.ru

Сабитов Рустэм Адиевич. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», институт компьютерных технологий и защиты информации, кафедра динамики процессов и управления, г. Казань. Доцент, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник. Количество печатных работ: более 100 (в т.ч. 1 монография). Область научных интересов: математическое моделирование, информационные системы и технологии, интеллектуальные системы управления, цифровое производство. E-mail: r.a.sabitov@mail.ru

Сиразетдинов Рифкат Талгатович. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», институт компьютерных технологий и защиты информации, кафедра динамики процессов и управления, г. Казань. Профессор, доктор технических наук, доцент. Количество печатных работ: более 100 (в т.ч. 2 монографии). Область научных

интересов: математическое моделирование и управление сложными динамическими системами, робототехника, искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. E-mail: rif-kat@inbox.ru

Епонешников Александр Вячеславович. Автономная некоммерческая организация высшего образования "Университет Иннополис", г. Иннополис, Республика Татарстан. Магистрант по направлению Информатика и вычислительная техника. Количество печатных работ: 6. Область научных интересов: искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления, статистическая радиофизика, анализ данных. E-mail: sashah275@gmail.com

Сабитов Шамиль Рустэмович. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет", Институт вычислительной математики и информационных технологий, кафедра технологии программирования, г. Казань. Доцент, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 85. Область научных интересов: математическое моделирование, искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления, информационные системы и технологии. E-mail: sh.r.sabitov@gmail.com

A Model of Sustainable Development Processes for the Digital Twin of Agricultural Production

G. S. Smirnova¹, R. A. Sabitov¹, R.T. Sirazetdinov¹, A.V. Eponeshnikov^{II}, Sh. R. Sabitov^{III}

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Russia, The Republic of Tatarstan, Kazan

^{II}Innopolis University, Russia, The Republic of Tatarstan, Innopolis

^{III}Kazan Federal University, Russia, The Republic of Tatarstan, Kazan

Abstract. The growing problems associated with the unpredictable emergence of global crisis processes and situations, inconsistencies between sectors of the world economy and emerging digital transformations in most areas of activity, actualize the search for effective solutions for the strategic management of the digital transformation process in any organization, including large and medium-sized companies agribusiness. The paper proposes an approach to building a model of a digital twin of agricultural production, which is based on the principle of sustainable economic development, harmoniously combining two interrelated processes: sustainability and development. Development requires expanding external relations, markets, and developing specialization. However, in cases of crisis, interruption of the supply of raw materials, closure of sales markets and other unfavorable circumstances, there should always be a part of the economy that is closed to itself, using its own resources and working for its consumers. The structural-mathematical model of sustainable development of the agricultural production process, based on the so-called model of a typical production unit, is considered. It is a system of algebraic equalities and inequalities that evaluate the power of individual components of the process and are based on balance relations. Within the framework of the proposed model, it is possible to consider the sustainable development of the economy of individual agricultural regions, exploring both components of the region's economy and achieving their harmonious interaction. The proposed models, customized for specific agricultural production online, can become the basis for its digitalization and serve as a tool for ensuring efficiency and continuous sustainable development.

Keywords: digital twin, identification, sustainable development, dynamic production models, industry 4.0, forecasting, agricultural production

DOI 10.14357/20718632210409

References

1. Babkin A.V. et al. 2018. Metodologiya razvitiya ekonomiki, promyshlennosti i sfery uslug v usloviyah cifrovizacii [The methodology for the development of the economy, industry and services in terms of digitization.] Polytech-press, Russia, Saint Petersburg. 48-90
2. Hess, et.al., 2016. Options for Formulating a Digital Transformation Strategy. MIS Quarterly Executive, 15 (2): 123-139.
3. Kitova, O.V, Bruskin, S.N. 2018. Cifrovaya transformaciya biznesa [Digital transformation of business]. Zhurnal «Cifrovaya ekonomika» [Digital Economy Magazine], 1: 20-25.

4. Kurganova, N.V., Filin, M.A., Chernyaev, D.S., Shaklein, A.G., Namiot D.E. 2019. Vnedrenie cifrovyyh dvoynikov kak odno iz klyuchevyyh napravleniy cifrovizatsii proizvodstva [Implementation of digital twins as one of the key areas of digitalization of production.] *International Journal of Open Information Technologies*, 7(5):105-114.
5. Ershov, K.V., Kusharev, A.A., Sirazetdinov, R.T. 2005. Virtual'noe predpriyatie po realizatsii remontnykh tekhnologiy na tekhnologicheskom oborudovanii [A virtual enterprise for the implementation of repair technologies on technological equipment.] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatcionnaya Tekhnika* [News of universities. Aviation equipment], 4: 54-56.
6. Koptyug, V. A., Matrosov, V. M., Levashov, V. K., Demyanko Y. G. 2001. Podhody k razrabotke nacional'noj strategii ustojchivogo razvitiya Rossii [Approaches to the development of a national strategy for sustainable development of Russia]. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry for sustainable development], 9: 493-502.
7. Sirazetdinov, R.T., 2017. Modelirovanie ustojchivogo razvitiya predpriyatiya. [Modeling of sustainable enterprise development.] *Trudy XI Mezhdunarodnoj Chetaevskoy konferentsii*. [Proceedings of the XI International Chetaev Conference]. Kazan. 192-200
8. Sirazetdinov, R. T., Samodurov, A. V., Khusnutdinov, A. N., Tarchinskaya, E. N. 2016. Sustainable Development of Manufacturing Enterprises Based on Structural, Infological and Dynamic Modeling. 10-th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. DOI: 10.1109/ICAICT.2016.7991783.
9. Ukaz Prezidenta RF ot 21.01.2020 N 20 «Ob utverzhdenii Doktriny prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii» [Decree of the President of the Russian Federation of 21.01.2020 N 20 "On the approval of the Doctrine of food security of the Russian Federation"], *Inform.-pravov. sistema «Konsul'tantPlyus»*. [Inform.- right. the "ConsultantPlus" system. Version from 01.03.2020]
10. Sirazetdinov, R.T. 1998. Matematicheskoe modelirovanie moshchnosti infrastruktury slozhnykh sistem. [Mathematical simulation of the capacity of the infrastructure of complex systems]. *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems]. 3:96-104.
11. Smirnova, G.S., Sabitov, R.A., Korobkova, E.A., Sabitov, Sh.R. 2017. Modeling production facility as a dynamic integrated interacting objects system. *Procedia Computer Science*, 112: 965–970
12. Sirazetdinov, T.K. 1972. Dinamicheskaya model' prognozirovaniya i optimal'noe upravlenie ekonomicheskim ob'ektom [A dynamic forecasting model and optimal control of an economic object.] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatcionnaya Tekhnika* [News of universities. Aviation equipment], 4: 32-38.
13. Sirazetdinov, T.K. 1996. Dinamicheskoe modelirovanie ekonomicheskikh ob'ektov [Dynamic modeling of economic objects]. *Fen, Akademiya Nauk RT* [Feng, RT Academy of Sciences]. Russia, Kazan. 224 p.
14. Sirazetdinov, T.K., Rodionov, V.V., Sirazetdinov, R.T. 2005. Dinamicheskoe modelirovanie ekonomiki regiona [Dynamic modeling of the region's economy]. *Fen, Akademiya Nauk RT* [Feng, RT Academy of Sciences]. Russia, Kazan. 320 p.
15. Sirazetdinov, R.T., Brazhkina, A.A. 2010. Universal structural model of a typical economic cluster. *Management of large systems*, 29: 152-166.
16. Sirazetdinov, R.T. 2018. Matematicheskie modeli riska v krizisnykh situatsiyah [Mathematical models of risk in crisis situations]. *Vestnik NCBZHD* [Bulletin of the NCBZD]. 4 (38):129-134.
17. Sirazetdinov, R.T. Rizaev, Z.I. 2012. Algoritmy ocenki vpolnimosti proekta i raspredeleniya zadaniy na osnove matematicheskogo modelirovaniya kompetencij rabotnikov [Algorithms for assessing the feasibility of the project and the distribution of tasks based on mathematical modeling of employee competencies]. *Nelinejnyj mir* [Non-linear world]. 10(5): 317-321.
18. GOST R 50.1.028-2001 Informacionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo cikla produkcii. Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya [Information technologies for product lifecycle support. Functional modeling methodology].
19. Eidelman, M.R. 1966. Mezhotraslevoj balans obshchestvennogo produkta (Teoriya i praktika ego sostavleniya) [Interindustry balance of the social product (Theory and practice of its compilation)]. *Statistics, Moscow*. 375 p.

Smirnova G. S. PhD, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», 420111, Russia, The Republic of Tatarstan, ul. Karla Marksa, 10, e-mail: seyl@mail.ru

Sabitov R. A. PhD, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», 420111, Russia, The Republic of Tatarstan, ul. Karla Marksa, 10, e-mail: r.a.sabitov@mail.ru

Sirazetdinov R.T. Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», 420111, Russia, The Republic of Tatarstan, ul. Karla Marksa, 10, e-mail: rif-kat@inbox.ru

Eponeshnikov A.V. Master's student, Autonomous noncommercial organization of higher education "InnopolisUniversity", 420500, Russia, The Republic of Tatarstan, Russia, Innopolis, Universitetskaya str., 1; e-mail: sashah275@gmail.com

Sabitov Sh. R. PhD, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan Federal University», 420001, Russia, The Republic of Tatarstan, Kazan, ul. Kremlevskaya, 18; e-mail: sh.sabitov@gmail.com