

УДК 519.876.2

DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.022

Д.А. Петросов¹, В.А. Игнатенко¹, Н.В. Петросова¹, А.Н. Зеленина²
**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ИННОВАЦИОННЫХ
АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Белгородский государственный аграрный
университет имени В.Я. Горина

²Воронежский институт высоких технологий – автономная
некоммерческая образовательная организация высшего образования

В большинстве существующих моделей и методов интеллектуального структурного синтеза имитационных моделей технологических процессов не уделяется внимание предметной области агропроизводства. В данной работе рассматривается возможность применения генетических алгоритмов в качестве основного инструментального средства синтеза моделей на основе заданного поведения, которое представляет собой заданное множество входных векторов, обработанное во множество эталонных. В качестве инструментального средства адаптации эволюционной процедуры (генетического алгоритма) предложено использование вложенных сетей Петри, на основе которых разработана модель, позволяющая выполнить процедуру интеллектуального синтеза. Описание элементной базы компонентов технологического процесса выполнено на основе выбранного математического инструментария, что позволяет ограничиться математическим аппаратом для решения задачи интеллектуального структурного синтеза имитационных моделей технологических процессов. В качестве средства для предварительного описания структуры синтезируемой модели, предлагается использовать современные методологии описания бизнес-процессов, такие как IDEF3. В работе рассмотрен технологический процесс внесения удобрений, предложена элементная база имитационных моделей компонентов технологической цепочки, созданная с применением программного средства PIPE v 4. Приведены примеры работы предложенных моделей и методов.

Ключевые слова: технологический процесс, имитационное моделирование, сети Петри, генетические алгоритмы.

1. Введение

Одним из стратегических научных направлений является разработка моделей и методов интеллектуального структурного синтеза больших дискретных систем на основе заданного поведения, что является частным случаем более общей проблемы синтеза «черного ящика». Данные модели должны позволить повысить эффективность не только разрабатываемых, но и существующих информационных систем при решении многокритериальных задач.

В современном сельском хозяйстве прослеживается тенденция к постоянному развитию технологий. И это связано как с развитием

технологических процессов, так и с внедрением информационных технологий. Инновационные проекты в агробизнесе могут быть нацелены не только на получение максимальной экономической выгоды, но и на развитие социальной, экологической, климатической и прочих составляющих будущего сельских территорий. Поэтому можно говорить о наличии нескольких целей при синтезе инновационного проекта в аграрное производство, то есть такого рода задачи являются многокритериальными. Соответственно возникает сложность при принятии управленческих решений на этапах его оценки, внедрения, сопровождения, а также изменения элементов и связей технологических цепочек, связанных с корректировкой внешних факторов. Изменение взаимосвязей компонентов технологического процесса относится к более общей задаче структурного синтеза. Таким образом, возникает задача по созданию интеллектуальных систем поддержки принятия решений, которые были бы направлены на структурный синтез инновационного процесса производства сельскохозяйственной продукции, а для этого требуется разрабатывать новые математические модели и методы, которые могли бы стать алгоритмической основой для такого рода систем. [1-5]

2. Материалы и методы

В данной работе предложено использование генетического алгоритма, адаптированного к задаче структурного синтеза инновационных технологических процессов с помощью математического аппарата теории сетей Петри. Структуру синтезируемой системы предлагается определить с использованием методологии IDEF3, так как она позволяет моделировать и документировать технологические процессы.

2.1 Генетические алгоритмы

Генетический алгоритм относится к эвристическим методам поиска, которые не могут гарантировать точность или оптимальность найденного решения, но при этом достаточны для решения поставленной задачи. Данная эволюционная процедура требует адаптации к решаемой задаче. Адаптацию можно провести с помощью математического аппарата описания его функционирования, а так же с применением настроек работы его операторов:

- селекции;
- скрещивания;
- мутации;

– редукации.

2.2 Математический аппарат теории сетей Петри

При выполнении адаптации генетического алгоритма к решению задачи структурного синтеза имитационных моделей инновационных технологических процессов, следует не забывать о быстродействии систем поддержки принятия решений, которые могут состоять не только из программного кода, но и из аппаратной составляющей. Поэтому требуется не потерять свойство параллелизма, которым обладает генетический алгоритм.

Математический аппарат теории сетей Петри не только обладает свойством параллелизма, но и имеет большое количество современных расширений, позволяющих описывать как дискретные, так и непрерывные процессы с учетом временных характеристик, и использования различных видов ресурсов в одной модели. Такого рода свойства математического инструментария являются важными при структурном синтезе имитационной модели технологического процесса, которая позволит выполнить моделирование технологической, экономической или социальной составляющих модели с учетом времени. [2]

Стоит отметить, что разрабатываемая модель генетического алгоритма, и модели элементной базы синтезируемого технологического процесса можно объединить с помощью такого расширения теории сетей Петри, как вложенные сети Петри (ВСП). Данный математический аппарат позволяет выполнить многоуровневую вложенность, то есть метка на каждом уровне вложенности сети, сама являются сетью.

Таки образом верхний уровень сети Петри будет представлять собой модель генетического алгоритма, где позиции служат для хранения меток, переходы моделируют работу операторов генетического алгоритма, а метка данного уровня является имитационной моделью технологического процесса также на основе сети Петри.

Данный подход позволяет выполнять структурный синтез технологических процессов, оставаясь в рамках одной модели и математического аппарата.

3. Решение задачи

3.1 Постановка задачи структурного синтеза инновационного агротехнологического процесса

Для решения задачи структурного синтеза имитационных моделей инновационного агротехнологического процесса с заданным поведением (способных обрабатывать заданный входной вектор в эталонный выходной) следует разработать модель генетического алгоритма на основе математического аппарата теории сетей Петри. При этом связи между компонентами и разветвления процесса заданы с помощью диаграммы, реализованной на основе методологии IDEF3.

3.2 Решение задачи структурного синтеза инновационного агротехнологического процесса

Дано:

$$S = \langle K, E \rangle,$$

где S – технологический процесс имитационную модель которого требуется синтезировать;

K – структура агротехнологического процесса;

E – состав его состав.

Технологический процесс S состоит из множества элементов

$$E = (E_1, \dots, E_R),$$

где E_i – i -й компонент,

R – общее количество элементов процесса.

Каждому элементу синтезируемого процесса может быть сопоставлено множество аналогов, способных выполнять одинаковую функцию, то есть

$$E_i = \{ E_{ij} \}_{j=1}^{M_i},$$

где E_{ij} – j -аналог для i -го компонента, а M количество аналогов.

Агротехнологический процесс должен обладать некоторым множеством свойств U .

$$U = \{ U_k \}_{k=1}^L.$$

Следовательно, на этапе структурного синтеза технологического процесса S следует найти такую конфигурацию компонентов $E_{ij(k_0)}$, которая смогла бы обеспечить требуемый результат функционирования имитационной модели технологического процесса S .

Выполним переход к математическому аппарату теории сетей Петри.

Для каждого аналога элемента технологического процесса $E_{ij(k_0)}$, обладающего определенным свойством требуется создать имитационную модель основе сети Петри PN_{ij} . Для определения взаимосвязей между элементами предлагается использовать соотношение выход компонента

OUT_i и вход последующего IN_i , для их соединения используется дуга L , которая проходит через переход T , то есть

$$F : T \rightarrow \bigcup_{i=1}^R (IN_i \cup OUT_i).$$

Данное соответствие позволяет определить взаимосвязь элементов имитационной модели синтезируемого инновационного агротехнологического процесса с использованием сетей Петри. [7, 8]

Тогда синтезируемая имитационная модель агротехнологического процесса имеет вид:

$$PN = \langle PN_1, \dots, PN_i, \dots, PN_R, T, F \rangle$$

Таким образом представляется метка верхнего уровня генетического алгоритма.

Модель генетического алгоритма с применением теории ВСП .

$$PN_{GA} = \langle P, T, L, M_0 \rangle,$$

где PN_{GA} - является моделью генетического алгоритма на основе ВСП;

P – множество позиций для хранения результатов функционирования переходов T ;

T – множество переходов верхнего уровня сети, моделирующие работу операторов генетического алгоритма;

L – множество дуг, соединяющих множество позиций P и переходов T ;

M_0 – начальная маркировка сети (каждая метка представляет из себя сеть Петри, моделирующую работу синтезируемого технологического процесса).

Предложенная модель генетического алгоритма на основе ВСП показана на Рисунке 1.

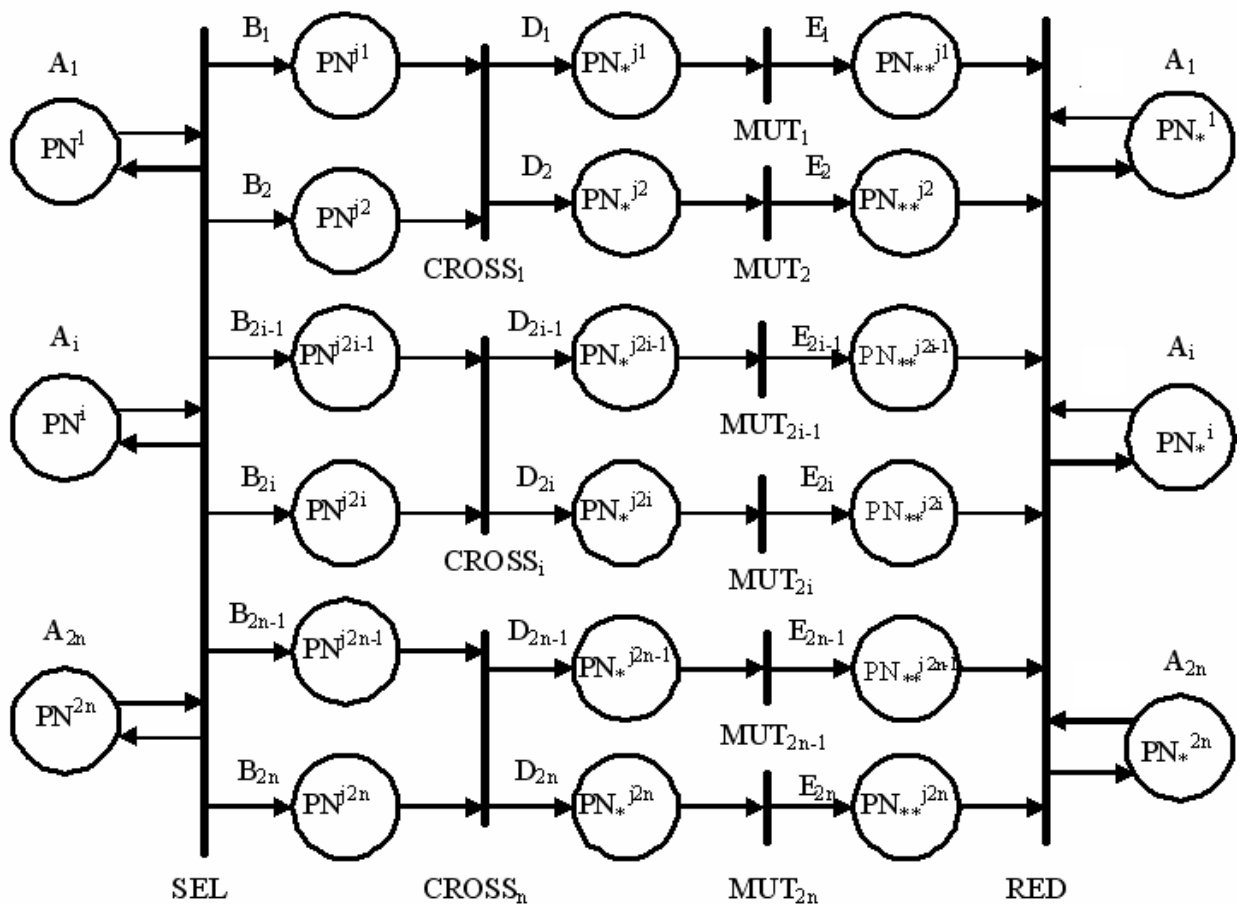


Рисунок 1 – Модель генетического алгоритма на основе ВСП

Для проведения вычислительного эксперимента, по оценке полученной модели требуется создать шаблона синтезируемой имитационной модели технологического процесса требуется воспользоваться экспертным мнением и методологией IDEF3.

На Рисунке 2 показан пример технологического процесса внесения удобрений при выращивании озимой пшеницы (упрощенная модель процесса составлена с привлечением ведущих специалистов в области агрономии и агрохимии Белгородского ГАУ им. В. Я. Горина).

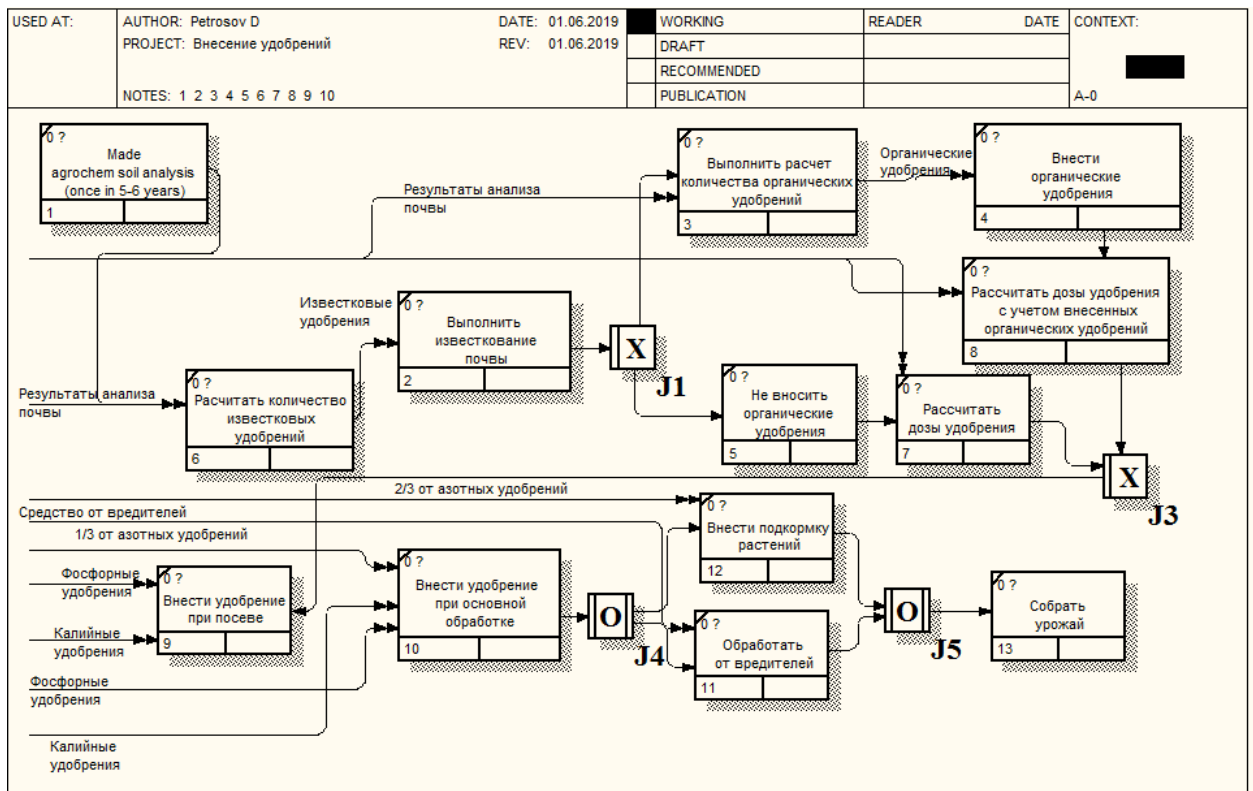


Рисунок 2 – Пример технологического процесса внесения удобрений при выращивании озимой пшеницы

Создадим модель технологического процесса для вычисления общей стоимости работ, в зависимости от выбранной стоимости (см. рис. 3). В данной модели переход T_0 инкрементирует вес метки H на стоимость операции.

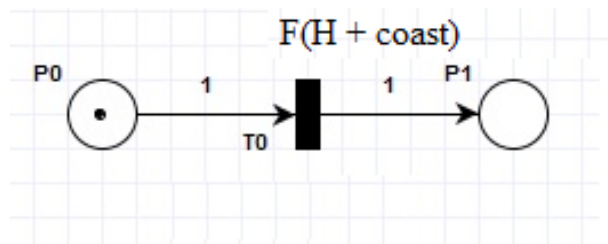


Рисунок 3 – Модель расчета стоимости операции этапа технологического процесса

В Таблице 1 представлены варианты стоимости каждого из процессов с учетом работы техники, оплаты труда и стоимости материалов, которые возникают при выращивании озимой пшеницы (работы, выполняемые агрономом хозяйства взяты из расчета 0 рублей).

Так как генетический алгоритм работает с бинарной строкой, для обеспечения соответствия каждого экземпляра компонента синтезируемого технологического процесса бинарной записи, в Таблице проиллюстрированы двоичные коды каждого экземпляра. В примере рассматривается три аналога каждого процесса, соответственно для кодирования используется два разряда: 00, 01, 10, 11. Для того, чтобы комбинация 11, имела в бинарной строке смысл, в процессе работы операторов генетического алгоритма, его следует присвоить (в качестве второго кода) одному из экземпляров, на усмотрение эксперта.

Таблица 1 - Элементная база для процедуры структурного синтеза технологического процесса

№	Название операции	Условное обозначение	Бинарное представление	Стоимость одного поля 50 га, т.р.
1	Выполнить агрохимический анализ почвы	ААХП250	00	250
		ААХП0	01	0
		ААХП350	10 (или 11)	350
2	Выполнить известкование почвы	ВИП1500	00	1500
		ВИП2000	01	2000
		ВИП2500	10 (или 11)	2500
3	Внести органическое удобрение	ВОУ2000	00	2000
		ВОУ 0	01	0
		ВОУ 1500	10 (или 11)	1500
4	Внести удобрение при посеве	ВУП1000	00	1000
		ВУП1500	01	1500
		ВУП0	10 (или 11)	0
5	Внести удобрение при основной обработке	ВУОО1500	00	1500
		ВУОО1600	01	1600

		ВУ000	10 (или 11)	0
6	Внести подкормку растений	ВПР1200	00	1200
		ВПР 1300	01	1300
		ВПР 0	10 (или 11)	0
7	Обработка от вредителей	ОВ1000	00	1000
		ОВ1050	01	1050
		ОВ0	10 (или 11)	0
8	Собрать урожай	СУ1000	00	1000
		СУ1400	01	1400
		СУ2000	10 (или 11)	2000

Таким образом на основании представленных компонентов и экземпляров будет сформирована начальная популяция по следующей структуре:

$$\langle OR, AAXPi, VIPi, X, BOYi, X, VUPI, X, BUOi, VPI, OBi, CYi \rangle$$

где X и OR – вид перекрестка (не подвергается воздействию операторов генетического алгоритма, следовательно, могут не учувствовать в процедуре интеллектуального синтеза).

Пример особи популяции и ее представление в бинарном коде:

$$AAXI250, \\
 VIP1500, BOY2000, VUPI1500, BUO0, VPI1300, OBI1050, CY1000 = \\
 0000000110010100$$

Макро-метка в виде сети Петри, соответствующая представленной особи показана на Рисунке 7.

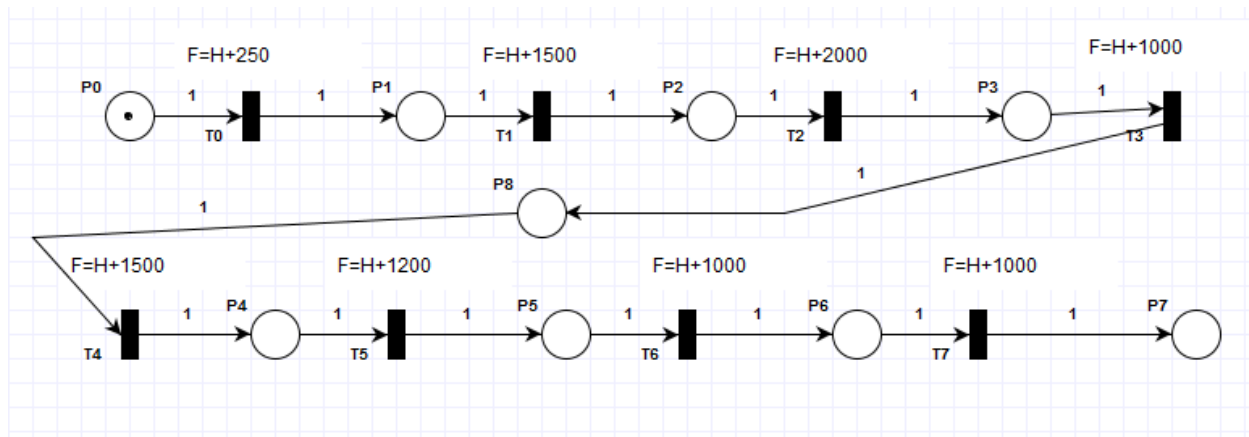


Рисунок 7 – Пример особи популяции на основе сетей Петри

Был реализован поиск решения при требовании бюджета выращивания 7300 тыс. рублей.

В результате имитационного моделирования был получен ряд удовлетворяющих решений за 7 секунд:

$0100010000000000 = \text{ААХП}0, \text{ВИП}1500, \text{ВОУ}0, \text{ВУП}1000, \text{ВУО}1500, \text{ВП}1200, \text{ОВ}1000, \text{СУ}1000 = 7200 \text{ тыс. руб.}$

$0100010000000001 = \text{ААХП}0, \text{ВИП}1500, \text{ВОУ}0, \text{ВУП}1000, \text{ВУО}1500, \text{ВП}1200, \text{ОВ}1000, \text{СУ}1400 = 7400 \text{ тыс. руб.}$

$0100010000001101 = \text{ААХП}0, \text{ВИП}1500, \text{ВОУ}0, \text{ВУП}1000, \text{ВУО}1500, \text{ВП}1200, \text{ОВ}0, \text{СУ}1000 = 6200 \text{ тыс. руб.}$

$0000010000001000 = \text{ААХП}250, \text{ВИП}1500, \text{ВОУ}0, \text{ВУП}1000, \text{ВУО}1500, \text{ВП}1200, \text{ОВ}0, \text{СУ}1000 = 6450 \text{ тыс. руб}$

4. Обсуждение

В работе рассмотрен подход и предложены модели метода синтеза имитационных моделей агротехнологических процессов, с использованием: имитационного моделирования, теории сетей Петри и генетического алгоритма. Полученные модели дают возможность синтеза моделей технологических процессов в различных предметных областях. В статье приведен пример работы предложенных моделей и методов при подборе агротехнологического процесса на основании стоимости внесения удобрения при выращивании озимой пшеницы. Использование математического аппарата теории сетей Петри дает возможность решать задачу нескольких показателей одновременно.

5. Заключение

Предложенные в работе имитационные модели позволяют влиять на скорость поиска решений, это достигается изменением функций переходов верхнего уровня [2, 6]. Использование математического аппарата теории сетей Петри, обладающего свойством параллелизма, может быть использовано совместно с технологией GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) [9], что позволит увеличить быстродействие интеллектуальной системы поддержки принятия решений при программной реализации.

Благодарности:

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ:

№ 16-29-12911 офи_м

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломазов, В.А. Учет чувствительности результатов многокритериального оценивания от изменений экспертных суждений при выборе региональных инновационно-инвестиционных проектов в области здравоохранения [Текст] / В.А. Ломазов, Е.В. Нестерова, Д.А. Петросов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 3. С. 192-196.
2. Петросов, Д.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в задачах синтеза технологических процессов при выращивании сельскохозяйственных культур [Текст] / Петросов Д.А. // *Сборник научных статей по итогам работы международного круглого стола*. 2018. С. 173-175.
3. Подлазова, А. В. Генетические алгоритмы на примерах решения задач раскроя [Электронный ресурс] / А. В. Подлазова // *Проблемы управления*. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-algoritmy-na-primerah-resheniya-zadach-raskroya> (дата обращения: 11.06.2019)
4. Канюков, С.И. Генетический алгоритм проектирования основных переходов в САПР технологических процессовковки валов [Электронный ресурс] / С.И. Канюков, А.В. Коновалов // *Программные продукты и системы*. 2015. №3 (111) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskiy-algoritm-proektirovaniya->

osnovnyh-perehodov-v-sapr-tehnologicheskikh-protssesov-kovki-valov (дата обращения: 11.06.2019).

5. Науменко В. В. Применение генетического алгоритма для решения задачи распределения ресурсов в процессе выполнения административных регламентов [Текст]/ В. В. Науменко // Молодой ученый. 2014. №4. С. 218-224.
6. Птушкин, А.И. Алгоритм структурной оптимизации технологического процесса при дефиците времени на его выполнение [Текст]/ А.И. Птушкин, Д.В. Решетников, А.С. Кокарев, А.В. Трудов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-5. – С. 918-922.
7. Ивутин, А. Н. Теория сетей Петри и ее расширения [Электронный ресурс]/ А. Н Ивутин., Е. И. Дараган // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-setey-petri-i-ee-rasshireniya> (дата обращения: 13.06.2019).
8. Мальков, М. В. Сети Петри и моделирование [Электронный ресурс]/ М. В. Мальков, С. Н. Малыгина // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seti-petri-i-modelirovanie> (дата обращения: 11.06.2019).
9. Петросов, Д.А. Применение параллельных вычислений в интеллектуальных системах управления /Петросов Д.А.// Информационно-аналитические системы и технологии Материалы V международной конференции. 2018. С. 24-29.

D.A. Petrosov¹, V.A. Ignatenko¹, N.V. Petrosova¹, A.N. Zelenina²

**STRUCTURAL SYNTHESIS OF INNOVATIVE
AGROTECHNOLOGICAL PROCESSES WITH THE APPLICATION
OF GENETIC ALGORITHMS**

¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Belgorod State Agrarian University named after V.Y. Gorina*

²*Voronezh Institute of High Technologies – an autonomous non-profit educational organization of higher education*

In the majority of existing models and methods of intellectual structural synthesis of simulation models of technological processes, the subject area of agricultural production is not paid attention. This paper discusses the possibility of using genetic algorithms as the main tool for model synthesis based on a given behavior, which is a given set of input vectors processed into a set of reference vectors. As a tool for adapting the evolutionary procedure (genetic algorithm), the use of nested Petri nets is proposed, on the basis of which a model has been

developed that allows one to perform an intelligent synthesis procedure. The description of the element base of the components of the technological process is also carried out on the basis of the chosen mathematical tools, which allows it to be limited to one mathematical apparatus for solving the problem of intelligent structural synthesis of simulation models of technological processes. As a means for a preliminary description of the structure of the synthesized model, it is proposed to use modern methodologies for describing business processes, such as IDEF3. The paper discusses the technological process of fertilizer application, proposes the element base of simulation models of the technological chain components created using the PIPE v 4 software tool. Examples of the work of the proposed models and methods are given.

Keywords: technological processes, simulation modeling, theory of Petri nets, genetic algorithms.

REFERENCES

1. Lomazov, V.A. Uchet chuvstvitel'nosti rezul'tatov mnogokriterial'nogo ocenivaniya ot izmenenij ekspertnyh suzhdenij pri vybore regional'nyh innovacionno-investicionnyh proektov v oblasti zdravoohraneniya [Tekst] / V.A. Lomazov, E.V. Nesterova, D.A. Petrosov // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 3. S. 192-196.
2. Petrosov, D.A. Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenij v zadachah sinteza tekhnologicheskikh processov pri vyrashchivanii sel'skohozyajstvennykh kul'tur [Tekst] /Petrosov D.A.// Sbornik nauchnykh statej po itogam raboty mezhdunarodnogo kruglogo stola. 2018. S. 173-175.
3. Podlazova, A. V. Geneticheskie algoritmy na primerah resheniya zadach raskroya [Elektronnyj resurs]/ A. V. Podlazova // Problemy upravleniya. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-algoritmy-na-primerah-resheniya-zadach-raskroya> (data obrashcheniya: 11.06.2019)
4. Kanyukov, S.I. Geneticheskij algoritm proektirovaniya osnovnykh perekhodov v SAPR tekhnologicheskikh processov kovki valov [Elektronnyj resurs]/ S.I. Kanyukov, A.V. Konovalov // Programmnye produkty i sistemy. 2015. №3 (111) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskij-algoritm-proektirovaniya-osnovnykh-perekhodov-v-sapr-tehnologicheskikh-protsessov-kovki-valov> (data obrashcheniya: 11.06.2019).
5. Naumenko V. V. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadachi raspredeleniya resursov v processe vypolneniya administrativnykh reglamentov [Tekst]/ V. V. Naumenko // Molodoj uchenyj. 2014. №4. S. 218-224.
6. Ptushkin, A.I. Algoritm strukturnoj optimizacii tekhnologicheskogo processa pri deficite vremeni na ego vypolnenie [Tekst]/ A.I. Ptushkin, D.V. Reshetnikov, A.S. Kokarev, A.V. Trudov // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – № 11-5. – S. 918-922.

7. Ivutin, A. N. Teoriya setej Petri i ee rasshireniya [Elektronnyj resurs]/ A. N Ivutin., E. I. Daragan // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2012. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-setey-petri-i-ee-rasshireniya> (data obrashcheniya: 13.06.2019).
8. Mal'kov, M. V. Seti Petri i modelirovanie [Elektronnyj resurs]/ M. V. Mal'kov, S. N. Malygina // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2010. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seti-petri-i-modelirovanie> (data obrashcheniya: 11.06.2019).

Petrosov, D.A. Primenenie parallel'nyh vychislenij v intellektual'nyh sistemah upravleniya /Petrosov D.A.// Informacionno-analiticheskie sistemy i tekhnologii Materialy V mezhdunarodnoj konferencii. 2018. S. 24-29