

УДК 004.891.2

МНОГОМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ КОРМОВ ИЗ ТРАВ

Семенов А.И., Спесивцев А.В. (Санкт-Петербург)

Введение

При разработке современных автоматизированных систем многофакторного планирования и корректировки выполнения сельскохозяйственных технологий, где большинство задач оценивания и принятия решений осуществляется человеком, остро стоит проблема преодоления существенной неопределенности исходной информации. В связи с этим актуальной становится задача построения математических моделей локальных и многофакторных технологических производств. При традиционном подходе к решению рассматриваемых задач используют имитационные модели, позволяющие учитывать неопределенные факторы, связанные с технологическими переменными, ненадежностью техники, погодными факторами и т.п. Однако из-за отсутствия требуемых репрезентативных выборок статистических данных по многим существенным факторам целесообразно использовать экспертные знания. В докладе приведены методики использования многомодельного подхода, в том числе и нечетко-возможностного с учетом явных и неявных экспертных знаний, при проектировании и коррекции как технологического процесса производства кормов из трав, так и планов его реализации. На основе подобных методик разрабатываются и внедряются.

Средством управления технологиями могут послужить системы поддержки принятия решений (СППР) [4]. СППР в сельском хозяйстве представляет собой интерактивную систему визуализации, которая собирает и обрабатывает различные входные данные — установленные на ферме датчики собирают измеряемую информацию о её состоянии. Наличие такой информации позволяет агрономам принимать необходимые решения для выполнения комплекса производственных задач на ферме.

СППР относится к классу интерактивных компьютеризированных информационных систем, позволяющих управленцам взаимодействовать с большими массивами сложных данных, при этом прибегая к применению как аналитических методов, так и имитационному моделированию

При этом для принятия обоснованных управлеченческих решений специалистам необходимо применять подходы и методы многокритериального выбора. Исследования показали, что для решения рассматриваемой задачи планирования заготовки кормов целесообразно использовать комбинированнию нескольких подходов: онтологического, логико-динамического нечетко-возможностного.

Постановка задачи планирования процесса уборки трав на силос

Уборка трав на силос является заключительным этапом технологии производства силоса. На рисунке 1 в агрегированном виде описан алгоритм и технологический процесс заготовки силоса.

До начала выполнения технологических операций производятся следующие действия: учитываются данные прогноза погоды на время уборки трав, выявляется наличие соответствующих технических средств и достаточности количества горюче-смазочных материалов (ГСМ), достаточности количества обслуживающего персонала, определяется тип травостоя и расстояние до мест его будущего хранения.

Для решения задачи планирования процесса уборки трав на сilos надо разработать модели и алгоритмы, позволяющие в зависимости от погодных условий определить оптимальный вариант технологии заготовки силоса (рис.1), а также фронт работ по площади полей (га). Кроме того, на основе нечетко-возможностной модели (НВМ) требуется спрогнозировать урожайность (т/га) и энергетическую питательность кормов на 1 кг СВ (МДж).

До построения формальных моделей рассматриваемой предметной области целесообразно построить ее концептуальную модель. Известно, что онтологические описания являются главным инструментом при разработке и визуализации концептуальной модели любого сложного технического процесса, в том числе и рассматриваемого нами в данной статье [3-4].

На рисунок 2 представлены основные концепты, связанные с процессом заготовки кормов, и наиболее существенные информационные связи данных концептов друг с другом и внешней средой. Для построения рассматриваемых концептов и связей использовался свободно распространяемое программное средство Protégé 5.0 с открытым исходным кодом для редактирования онтологий и систем управления знаниями. На основе данной концептуальной модели проведем разработку двух моделей, позволяющих на конструктивном уровне описать исследуемые нами процессы.

Логико-динамические модели (ЛДМ)

ЛДМ позволяют определить наиболее предпочтительный вариант технологии заготовки кормов из трав, а также распределения соответствующих ресурсов.

В этом случае ЛДМ можно описать следующим образом [7].

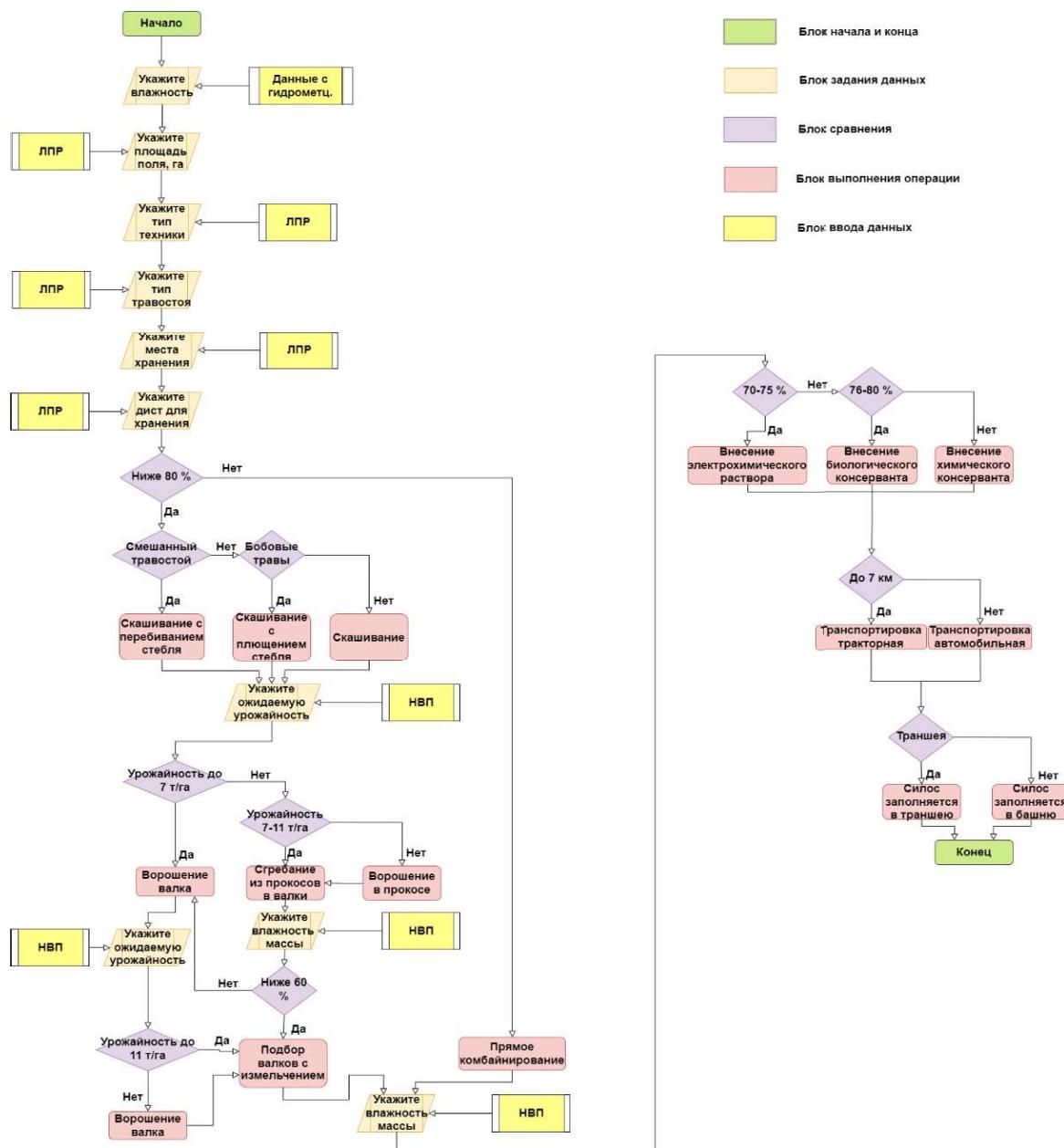


Рисунок 1 – Возможные технологии и алгоритм уборки трав на силос

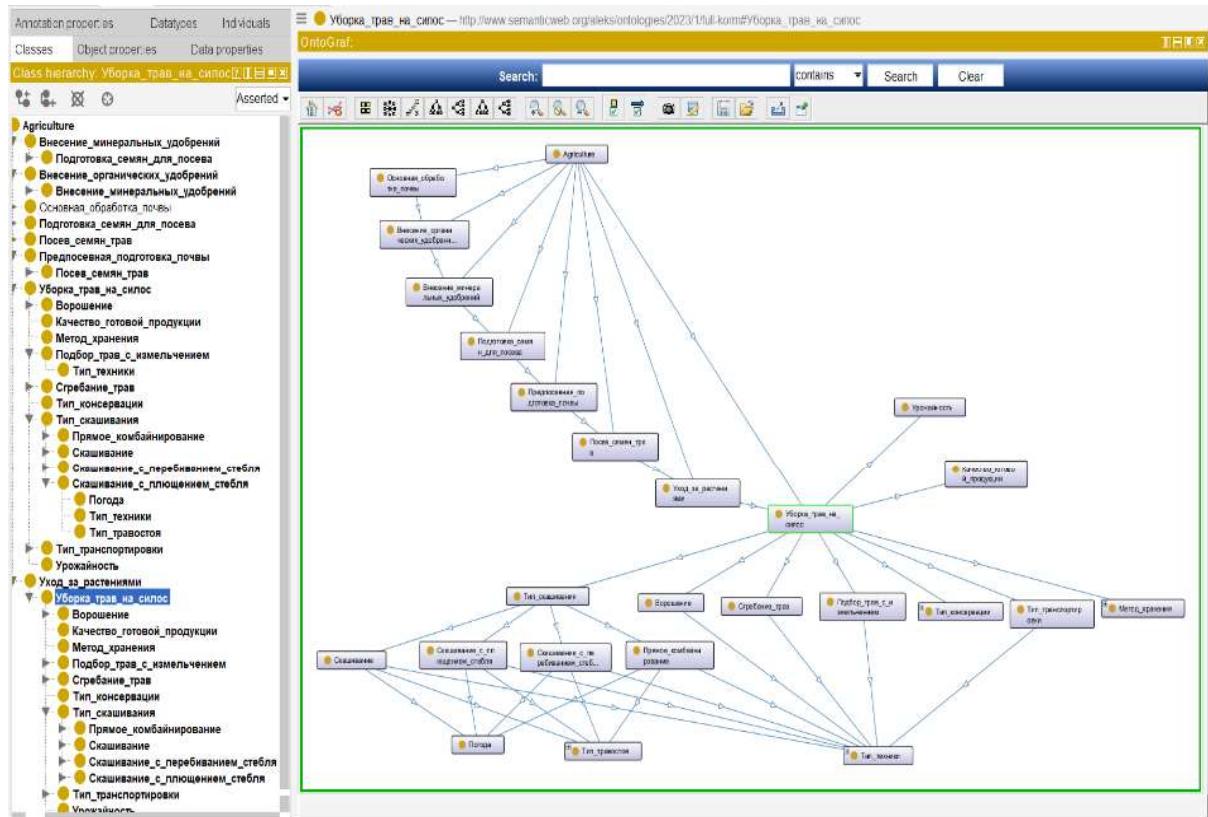


Рисунок 2 – Онтологическая модель процесса уборки трав на силос

Пусть: $I \in \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ – множество типов полей, подлежащих уборке; $K_k^i \in \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ – множество операций по уборке силоса на заданном поле; $R \in \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – множество ресурсов для уборки силоса, имеющихся в хозяйстве. В этом случае можно записать следующую ЛДМ.

$$\begin{aligned}
 M^{(0)} = & \left\{ u(t) | \dot{x}_{ik} = \sum_{r=1}^n e_{ik}(t) \cdot u_{ikr}; \dot{x}_r = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l u_{ikr}; \right. \\
 & x_{ik}(t_0) = 0; x_{ikr}(t_f) = a_{kr}; \\
 & \sum_{r=1}^n u_{ikr} \leq P_k, \forall i, \forall k; \\
 & \sum_{k=1}^l u_{ikr} \leq P_r, \forall i, \forall r; \\
 & \left. u_{ikr}(t) \in \{0,1\}; \right. \\
 & \sum_{r=1}^n u_{ikr} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} (a_{i\tilde{\alpha}} - x_{i\tilde{\alpha}}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} (a_{i\tilde{\beta}} - x_{i\tilde{\beta}}(t)) \right] = 0,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $M^{(0)}$ – логико-динамическая модель, которая включает в себя частные модели программного управления технологическими операциями и ресурсами, краевые условия, техническое ограничение, технологическое ограничение, ограничение на управляющее воздействие, логическое ограничение; x_{ik} – переменная, характеризующая состояние выполнения операции K_k^i в ходе реализации процесса производства силоса; к операциям K_k^i относятся операции скашивания, ворошения, сгребания, внесения

консервирующих добавок, подбор трав, выбор средств транспортировки и выбор места хранения; $e_{ik}(t)$ – известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с возможностью назначить ресурс R на выполнение операции K_k^i в рамках существующих и прогнозируемых пространственно-временных ограничений. Данная функция принимает значение 1, если соответствующие ограничения выполняются и 0 – в противоположном случае; $u_{ikr}=1$, если операции K_k^i выполняются с помощью одного из ресурсов, входящих в множество R и 0 – в противоположном случае; x_r – переменная, характеризующая время задействования ресурса R ; $a_{i\alpha}$, $a_{i\beta}$ – это заданные объёмы операций, которые входят в варианты реализации технологий производства силоса; Γ_{ik1} , Γ_{ik2} – множество номеров операций, проводимых в рамках операции K_k^i , а также непосредственно предшествующих и технологически связанных с ней с помощью логических операций «И», «ИЛИ»; P_k , P_r – заданные константы, характеризующие технико-технологические ограничения, связанные с возможностью использования тех или иных материальных и энергетических ресурсов при выполнении различных операций, связанных с производством силоса.

Качество выполнения программ управления процессом заготовки силоса можно оценить с помощью следующих показателей:

$$J_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{r=1}^n \int_{t_0}^{t_f} a_{ikr}(\tau) u_{ikr}(\tau); \quad (2)$$

$$J_2 = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^l [t_f - x_r(t_f)]^2; \quad (3)$$

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_f} dt; \quad (4)$$

где (2) – функционал, с помощью которого оценивается «своевременность» выполнения операций при различных условиях; a_{ikr} – «штрафная» функция, которая активируется при нарушении сроков какой-либо операции (операции указаны на рисунке 1); (3) – это функционал, введенный для оценивания степени равномерности использования ресурсов, имеющихся в хозяйстве; (4) – функционал введен для оценивания общего времени заготовки кормов из трав.

Используя построенную ЛДМ (1) - (4) можно задачу планирования заготовки кормов на силос сформулировать как задачу оптимального программного управления динамической системой (1), которую надо перевести из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с учетом всех пространственно-временных, технических и технологических ограничений, которые были описаны на рис.1 и рис 2.

Если таких фазовых траекторий окажется несколько, то следует из них выбрать наилучшую с точки зрения показателей качества вида (2) - (4).

Для решения данной задачи использовался известный метод последовательных приближений Крылова-Черноусько, позволяющий с высокой вычислительной эффективностью решать рассматриваемую краевую задачу [5]. Построенная ЛДМ и соответствующий план (программа управления) являются детерминированными и поэтому описывают технологические операции и процессы распределения ресурсов для их выполнения идеализировано, без учета возмущающих воздействий внешней среды.

Рассмотрим возможный вариант учета факторов неопределенности в предлагаемой модели. Для этого применим нечетко-возможностный подход для их описания.

Нечетко-возможностный подход (НВП) к учету факторов неопределенности, связанных с воздействием внешней среды

Покажем, как используя НВП, можно учесть факторы неопределенности на основе ранее разработанной методологии формализации явных и неявных знаний экспертов о рассматриваемой предметной области. Данная методология базируется на синтезе элементов нечеткой логики в совокупности с теорией планирования экспериментов. Более подробно она описана в работе [8].

Главная идея метода, реализующего рассматриваемую методологию, состоит в построении полиномиальной зависимости и соответствующей аппроксимационной многомерной поверхности откликов, описывающие причинно-следственные связи, содержащих и отражающих большинство свойств функционирования сложного объекта или процесса. Задаются эти связи не в дискретно-событийной форме, как это делается при имитационном моделировании, а в нечетко-продукционной форме, фиксирующей экспертные знания о рассматриваемом объекте или процессе.

Основные шаги нечетко-возможностного подхода включают в себя: установление факторного пространства ($\Phi\Gamma$) исследуемого объекта или явления; выявление интервала значений по каждому фактору. Так например, для представления информации о состоянии трав в виде лингвистической переменной была выбрана оппозиционная шкала $[-1;+1]$ (см. рис 3). Здесь «-1» соответствует состоянию трав, не готовых к уборке «низкое (Н)», «+1» – состояние трав, созревших для уборки «высокое (В)».

Далее процесс построения нечетко-возможностной модели включает последовательные шаги: разработка опросной экспертной матрицы, все строки которой содержат влияющие факторы на объект (в нашем случае состояние трав); экспертный опрос по построенной матрице, каждая строка которой является нечетким продукционным правилом, задающим ситуацию состояния оцениваемого явления с учетом принятого факторного пространства; преобразование вербальных оценок от экспертов в числовую форму, обращаясь к вербально-числовой таблице значений шкалы Y с последующей обработкой числовой информации методом теории планирования экспериментов; оценку влияния переменных по величине коэффициентов в полученной аналитической модели (Y); проверку адекватности расчетов полученной модели по мнению эксперта на соответствие с реальным состоянием объекта.

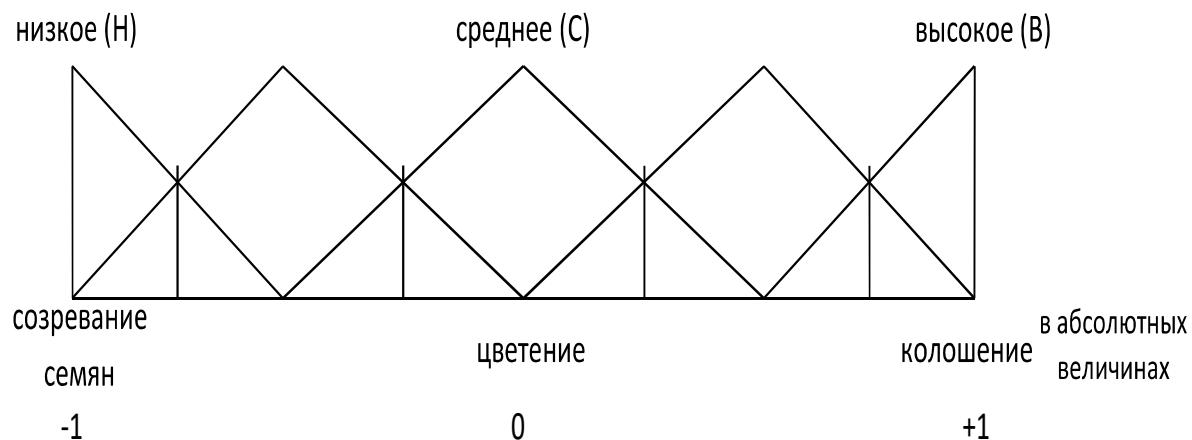


Рисунок 3 – Нечеткая шкала для лингвистической переменной «Фаза вегетации»

Так, на основе предложенной последовательности действий была построена новая алгебраическая модель (5) и решена задача предварительного оценивания и последующей корректировки прогноза урожайности трав на полях сельскохозяйственного производства и качества заготавливаемого силюса были построены соответствующие нечетко-возможностные модели [9].

Формализованная модель оценивания эффективности урожайности трав как метамодель первого уровня построена на факторном пространстве из пяти базовых нечетких лингвистических переменных и имеет следующий вид:

$$Y = 10,56 + 2,35x_1 + 4,39x_2 + 3,18x_3 + 1,28x_4 + 1,35x_5 - 0,43x_1x_3 + 0,79x_2x_3 - 0,41x_2x_5 + 0,92x_3x_5 - 0,37x_1x_3x_4 + 0,93x_1x_3x_5, \quad (5)$$

где x_1 – параметр, характеризующий агробиопотенциал угодий, x_2 – параметр, характеризующий погодно-климатические условия, x_3 – параметр, характеризующий технологический ресурс, x_4 – параметр, характеризующий энергетический ресурс, x_5 – параметр, характеризующий выращивание кормов.

В расчетной модели вычисления урожайности (5) конкретные значения таких внутренних лингвистических переменных как вид скашивания, интенсивность ворошений, вариант внесение консерванта и способ хранения кормов должны быть определены на основе решения задачи планирования с использованием ЛДМ (1)-(4) как задачи оптимизации. В этом и состоит связь между двумя рассматриваемыми классами моделей –логико-динамическими и нечетко-возможностными моделями (НВМ и ЛДМ).

Для дальнейшей детализации модели вида (5) была построена модель второго уровня, описывающая более подробно компоненты параметра x_3 (технологический ресурс) и включающая в себя следующие атрибуты: x_{31} – вариант фазы вегетации (рис.4), x_{32} – вид скашивания, x_{33} – вариант интенсивности ворошений, x_{34} – вариант внесения консерванта, x_{35} – способ досушивания, x_{36} –способ хранения. Модель для расчёта технологического ресурса имеет следующий вид:

$$x_3 = 8,859 + 0,703x_{31} + 0,109x_{32} + 0,172x_{33} + 0,359x_{34} + 0,140x_{35} + 0,359x_{36} - 0,109x_{34}x_{35} - 0,131x_{31}x_{34}x_{36} - 0,109x_{32}x_{33}x_{35} = 10,289 \quad (6)$$

Полученные полиномы (5) и (6) представлены переменными с коэффициентами, значения которых содержат экспертные знания в безразмерной стандартизованной шкале. Рассчитанные прогнозные значения урожайности трав, используемых для заготовки кормов, по моделям (5) и (6) учитываются при выборе и корректировке технологии по схеме, представленной на рисунке 1. Для этого в ходе численного решения задачи оптимального планирования вида (1) – (4) проводится внесения новой информации в условия трансверсальности, которая формируется на основе моделей (5)-(6). Данный обмен информации между ЛДМ и НВМ и определяет научную новизну предлагаемого подхода к автоматизации процесса планирования заготовки кормов. На основе данных моделей и предложенного двухэтапного алгоритма разработан прототип СППР.

Заключение

В данной статье на основании онтологического описания рассмотрен синтез подходов к разработке и использованию ЛДМ и НВМ нового типа для планирования процесса заготовки кормов из трав в условиях неопределенности воздействия внешней среды. При этом на примере решения задачи планирования производства кормов из трав предлагаемый новый подход является одним из первых шагов к созданию и применению автоматизированных систем проактивного мониторинга состояния сложных агробиотехнических объектов сельскохозяйственного производства. В статье

показано, что в условиях отсутствия необходимого объема статистических данных целесообразно осуществлять переход от имитационных моделей, традиционно описывающих процессы заготовки кормов, к комбинации двух классов моделей, а именно- детерминированной ЛДМ и нечетко-возможностной модели прогнозирования урожайности кормов.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Литература

1. **Pauschinger D., Klauser F.**. The introduction of digital technologies into agriculture: Space, materiality and the public–private interacting forms of authority and expertise. Journal of Rural Studies 91 (2022), 217–227.
2. **Athanasiou T., Balafoutis, Frits K. Van Evert, Spyros Fountas** Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. Agronomy 2020, 10, 743. doi:10.3390/agronomy10050743.
3. Sjoukje A. Osinga, Dilli Paudel, Spiros A. Mouzakitis, Ioannis N. Athanasiadis. Big data in agriculture: Between opportunity and solution. Agricultural Systems. Volume 195, January 2022, 103298.
4. **Kaur G., Sunesh, Sarita and Balhara A. K.** 2022. Role of Decision Support System in Agri-culture. Vigyan Varta 3(6):86-88.
5. **Крылов И.А., Черноусько Ф.Л.** О методе последовательных приближений для решения задач оптимального управления, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1962, том 2, номер 6, С. 1132–1139.
6. **Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И.** Теория систем и оптимального управления. Часть 2. Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. Министерство Обороны СССР. 1987. С. 494-579.
7. **Семенов А.И., Кулаков А.Ю.** Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 818-825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.
8. **Игнатьев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Спесивцев А.В.** Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб: Политех-Экспресс, 2018. 430 с
9. **Aleksey Sukhoparov, Aleksandr Spesivtsev** Evaluation of the efficiency of perennial grass cultivation on the basis of a fuzzy-possibility model /20th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT Proceedings, Volume 19, May 26-28, 2021, Jelgava, p.1768-1773.