

ЭНТРОПИЙНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Камалетдинов Р.Р., Мударисов С.Г.

Реферат. В статье обоснована методология оценки технологических операций сельскохозяйственных машин на основе энтропийных показателей качества и стабильности. Рассмотрены варианты их определения, основанные на графических построениях и аналитических расчётах. Приведены коэффициенты стабильности отдельных операций при возделывании и уборке картофеля. Оценено соответствие уровней агротехнических требований качеству выполнения отдельных операций. Определены операции, требующие дальнейшего совершенствования технологий и технических средств для их осуществления.

Ключевые слова: энтропия, качество, стабильность, операция, картофель, возделывание.

Введение. Одним из приоритетных направлений развития аграрного сектора экономики в России является переход к устойчивому развитию земледелия, в основе которого заложены принципы минимального негативного воздействия на окружающую среду, сохранения биоразнообразия, максимального использования и рационального распределения агробиологического потенциала природных ресурсов, снижения потерь выращенной продукции. Концепция устойчивого земледелия рассматривает возделывание сельскохозяйственных культур как сложный агробиологический процесс, в котором наряду с урожайностью должны быть учтены показатели использования и восстановления естественного плодородия почвы, изменения репродуктивных и потребительских свойств полученной продукции при длительном хранении и т.д. Это предопределяет необходимость разработки интегрального индикатора качества и стабильности выполнения как отдельных операций, так и технологического процесса в целом, позволяющего оценить разноплановые признаки и их совокупности в единых показателях. При этом данные показатели должны обеспечивать возможность суммарной оценки уровня достижения и итогового баланса целевых параметров признака. Реализация данных положений диктует необходимость изменения парадигмы оценки эффективности технологий и технических средств сельскохозяйственного производства. Необходимость решения подобных задач в ряде научных направлений, в частности, системного и прикладного программирования, проектирования сложных систем, привело к развитию энтропийной оценки уровня достижения целевых параметров [1,2,3,4,5]. Однако в области сельскохозяйственного производства возможности энтропийной оценки качества и стабильности процессов в полной мере не использовались.

Условия, материалы и методы исследований. В общепринятой трактовке соблюдение заданных требований качества может

быть представлена как совокупность пространства состояний, например, векторных полей. Границы пространства состояний определяется исходя из допустимых границ или диапазона полей допусков:

$$Y_{min} \leq y_i, \quad y_i \leq Y_{max}, \quad Y_{i min} \leq y_i \leq Y_{i max},$$

где y_i – величина значения i -го показателя параметра,

$Y_{i max}$ – максимальное значение допуска,

$Y_{i min}$ – минимальное значение допуска.

Соответствие заданным требованиям качества будет соблюдаться, если значение параметров данных показателей будут находиться внутри подпространства ограниченного границами допусков. Для оценки “попадания” отдельных параметров в заданный диапазон традиционно используются доверительные интервалы при выбранной надёжности, как выборочная средняя M_{cp} , дисперсия SS , коэффициент вариации V , уравнение регрессии и т.д. [6,7]. Имея развитый статистический аппарат, данная методология недостаточно эффективна при значительном увеличении числа значимых параметров, а также при необходимости одновременной оценки нескольких показателей качества, имеющих разные размерности.

На наш взгляд, для преодоления фактора “нарастания уровня сложности” наиболее приемлемы энтропийные критерии оценки уровня достижения порогового значения, получивших широкое распространение и успешно используемые во многих отраслях как научной, так и практической деятельности. Понятие энтропии впервые было введено в термодинамике для определения меры необратимого рассеяния энергии. В последующем понятие энтропия начала широко применяется и в других областях науки как показатель случайности или неупорядоченности строения физической системы или как мера неопределённости какого-либо опыта (испытания), который может иметь разные исходы и привязана к конкретным физическим объектам. В сельскохозяйственном производстве применение энтро-

пийных показателей наиболее часто встречается при изучении процессов сепарации различных смесей и рассматривается как мера разнородности состава этой смеси:

$$H(x) = \sum_{i=1}^m x_i \log_2 x_i,$$

где m – количество компонентов,
 x_i – концентрация i -го компонента.

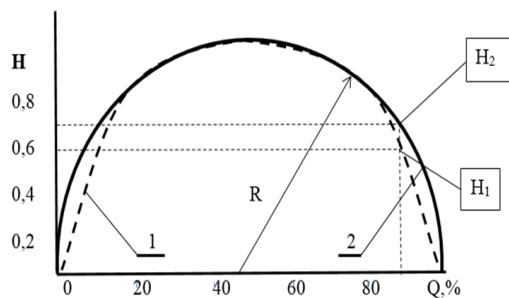
На рисунке 1 представлен график изменения энтропии H различных состояний системы, имеющего два исхода $k=2$, например, сепарации смеси, состоящей из компонентов A – проход и B – сход или параметры показателя, оцениваемые как A – соблюдение и B – нарушения агротехнических требований и т.д. радиуса R в масштабе $m=H/R$. Исходя из того, что на основании полученных данных можно определить вероятность p содержания в сходе компоненты или соблюдение агротехнических требований A , и вероятность $q=1-p$ содержания компоненты или нарушение предъявляемых требований B , энтропия для обоих случаев, независимо от их физической природы может быть определена как:

$$H = -p \cdot \log_2 p - (1-p) \cdot \log_2 (1-p).$$

При выборе масштаба отношении осей $2H = Q_{max}$, и проведя линию окружности радиусом R в соотношении $R=H$, мы получим линию полуокружности весьма близкую к графику энтропии.

Максимальные отклонения полученных графиков незначительны, что на этапах предварительного анализа позволяет заменить кривую энтропии на полуокружность и существенно упростить графические построения. В частности, при исходах A и B в соотношении 87% и 13% или $p=0,87$ и $q=0,13$, энтропия, определённая по графику полуокружности, равна $H_1=0,65$, по реальному графику энтропии – $H_2=0,67$.

Анализ и обсуждение результатов. Предложенный подход весьма удобен для предварительной оценки качества выполнения процессов, имеющих два исхода. В том случае,



1 – энтропия, 2 – полуокружность

Рисунок 1 – Графическое представление энтропии в зависимости от процентного соотношения Q компонентов бинарной смеси

когда вероятность какого-либо события или состояния p_i стремится к единице, энтропия $H(X)$ стремится к нулю. Если возрастает вероятность q альтернативного события, то энтропия увеличивается и достигнет максимума при равновероятных значениях, для бинарного случая $p = q = 0,5$. Когда вероятность альтернативного события q превышает 0,5 и данная величина становится приоритетной, то анализ удобней вести, выбрав в качестве основной вероятность альтернативного события. Аналогичны подходы при рассмотрении многомерных ансамблей X , при этом сохраняется возможность получения нормированной величины энтропии, при которой максимальная величина $H(X)=1$, при равенстве вероятностей p_i событий x_i .

Стабильность технологического процесса обуславливается постоянством распределений вероятностных характеристик параметров оценочных показателей во времени без вмешательства извне. При этом контролируемые параметры должны находиться внутри граничных условий и не наблюдается тренд к их выходу за пределы допусков. Одним из наиболее распространённых статистических инструментов оценки стабильности технологических процессов являются контрольные карты Шухарта, базирующихся на анализе попадания графиков, как правило, представленных в виде плотности нормального распределения, реальных параметров оценочных показателей и (или) их совокупности в поле заданного техническими условиями распределения. Вместе с тем построение контрольных карт требует значительных затрат времени и представляет собой достаточно сложную задачу, а достоверность результатов решения во многом зависит от опыта и уровня знаний эксперта [8]. С учётом этого, для определения “стабильности попадания” параметров показателя качества в заданные допуски, предлагается ввести безразмерный показатель – коэффициент стабильности K_c , рассчитываемый как отношение энтропии (неопределённости) оцениваемого параметра H_p , полученного в результате реальных замеров к энтропии H_d допустимых значений данного параметра. Если показателем качества выполнения отдельной операции выбран параметр, например, при уборке картофеля, представленный как доля содержания примесей в сходовом ворохе, неповреждённых и повреждённых клубней или растительной примеси и т.п., то коэффициент стабильности рассчитывается по зависимости:

$$K_c = \frac{H_p}{H_d} = \frac{-\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i - \sum (1-p_i) \log_2 (1-p_i)}{-((p_d \log_2 p_d + (1-p_d) \log_2 (1-p_d)) \times k')}$$

где p_i – значение оцениваемого параметра при i -ом измерении, представленная в долях

Таблица – Показатели стабильности отдельных технологических операций возделывания картофеля

№ п/п	Наименование операции	Агротехнические показатели качества	Допуск	Средний фактический показатель	Коэф. стабильности
1	Подготовка почвы	Содержание частиц: 0,25 - 10 мм. - более 50 мм. – Отклонение глубины -	≥ 50 % Нет ± 1 см	С.Г Мударисов ≥ 75% Нет ± 2 см.	1,7 1,0 0,18
2	Внесение удобрений	Отклонения нормы- Равномерность-	≤ 10% ≥ 75 %	Р.М. Латыпов 5% 85 %	1,6 1,3
3	Предпосевная обработка клубней	Отклонения нормы- Равномерность-	≤ 10% ≥ 75 %	Э.Р. Хасанов 5% 85 %	1,6 1,5
4	Посадка клубней	Отклонения: нормы - глубины - шага посадки- междурядий: основных- стыковых -	± 2% ± 2 см ≤ 25% ± 2 см ± 10 см	Н.Н. Колчин ± 2% ± 2 см 15% ± 2 см ± 10 см	1,0 1,0 1,3 1,0 1,0
5	Междурядная обработка	Повреждение растений	до 2 %	Р.К. Абдрахманов 2 %	1,0
6	Обработка химическими препаратами	Отклонение нормы- Равномерность: по ширине- по ходу -	± 5 % ≥50 % ≥20 %	М.М. Ганеев ± 5% 50% 20 %	1,0 1,0 1,0
7	Обработка микробиологическими препаратами	Отклонение нормы - Равномерность: по ширине- по ходу – Сохранность жизнеспособности КОЕ	± 5 % ≥50 % ≥20 % Нет данных	Р.Р. Камалетдинов ± 5% ≥50 % ≥20 % Нет данных	1,0 1,0 1,0 0,0
8	Удаление ботвы	Высота среза Скошенных стеблей	≤ 20 см. ≥ 70 %	П.Л. Максимов ≤ 20 см. ≥ 70 %	1,0 1,0
9	Уборка	Потери Повреждений Содержание почвы	≤ 5% ≤ 3% ≤ 10%	Н.И. Верецагин 3...5% 11...35% 22...45%	1,5-1,0 0,22-0,34 0,47-0,61
10	Хранение	Потери за 8 месяцев	≤ 7 %	К.А. Пшеченков 18–20%	0,50-0,53

от единицы;

p_d – допустимое значение параметра;

k_c – общее количество измерений.

В случае оценки отклонения параметров показателя качества от заданной средней, например, глубина хода почвообрабатывающего орудия, норма расхода рабочей жидкости и т.п., коэффициент стабильности k_c может быть определен:

$$k_c = \frac{\log_2(\sigma_p \times 2 / \sqrt{3})}{\log_2(2 \times \Delta x)},$$

где σ_p –среднеквадратическое отклонение оцениваемого параметра, полученного по результатам реальных замеров;

Δx – допустимое отклонение от средней.

Для случая оценки качества по среднеквадратическому отклонению нормального распределения коэффициент стабильности K_c рассчитывается по следующей зависимости:

$$K_c = \frac{\log_2(\sigma_p \times \sqrt{2 \times \pi \times e})}{\log_2(2 \times \Delta x)},$$

где σ_p – среднеквадратическое отклонение “оценочного” параметра, полученного по фактическим замерам;

σ_d – допустимое среднеквадратическое от-

клонение “оценочного” параметра.

Для показателей качества, например, крошения почвы, заражённости вредителями или болезнями, агробиологического фона и т.п., оцениваемых по совокупности параметров, коэффициент стабильности может быть определен как отношение сумм энтропии реальных и допустимых отклонений данных параметров:

$$K_c = \frac{\sum H_p}{\sum H_d} = \frac{-\sum_i^n \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i - \sum (1-p_i) \log_2 (1-p_i)}{-\sum_i^n p_d \log_2 p_d + (1-p_d) \log_2 (1-p_d) \times k}$$

где n – общее количество учитываемых параметров;

k - число замеров каждого из параметров.

Численные значения коэффициента стабильности свидетельствуют:

$k_c=1$ – показатель качества выполнения операции не выходит за рамки допуска, а оценочные параметры по данному показателю имеют достаточный уровень “требовательности” к ее выполнению;

$k_c > 1$ – операция выполняется с превышением заданного уровня качества, что может, наряду с значительным конструктивно-технологическим прогрессом, свидетельство-

вать о заниженных требованиях к данному показателю и необходимости корректировки полей допусков;

$k_c < 1$ – при выполнении операции по данному показателю не обеспечивается достижение требуемого уровня качества и необходимо принятие мер по устранению несоответствия.

В таблице в качестве примера приведены коэффициенты стабильности отдельных технологических операций при возделывании картофеля. Значения допусков выбирались из агротехнических требований на выполнение данных операций, реальные показатели - на основании фактического материала, накопленного на кафедре сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ и по литературным источникам.

Полученные данные показывают, что агротехнические показатели крошения почвы задавались исходя из использования пассивных рабочих органов, а применение орудий с активными рабочими органами (фрез) позволяет значительно улучшить степень крошения и ужесточить требования качества, что соответственно положительно скажется не только на условиях роста, но и на возможности механизированной уборки [9,10,11].

Выводы. Анализ технологических операций на основе энтропийных критериев позволил установить, что выполнение основного перечня операций возделывания картофеля соответствует агротехническим требованиям, за исключением отклонений глубины предпосадочной обработки почвы ($K_c=0,18$), травмирования клубней ($K_c=0,22\dots0,34$) и чистоты сходового вороха при уборке ($K_c=0,47\dots0,61$), что значительно ниже оптимального значения коэффициента стабильности равного единице. Для операций по использованию микробиологических препаратов на сегодняшний день отсутствуют показатели оценки качества их выполнения. Это свидетельствует, что именно повышение качества выполнения этих операций требует своего неотлагательного решения.

Подложенный подход позволяет рассмотреть разноплановые процессы в единых критерийных параметрах, оценить стабильность и определить соответствие уровней агротехнических требований и качество выполнения, как отдельных операций, так и их совокупности. Выбрать наиболее “проблемные” показатели и наметить перспективные направления поиска новых решений и дальнейшего совершенствования конструктивно-технологических параметров технических средств механизации сельского хозяйства

Литература

1. Барский Л.А., Рубинштейн Ю.Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых [Текст] / Л. А. Барский, Ю. Б. Рубинштейн. – Москва : Недра, 1970. – 312 с.
2. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности. Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили ; Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова. – Москва : Наука, 2003. – 428 с. – Режим доступа: http://apolov-oleg.narod.ru/olderfiles/1/Prangishvili_I.V_Entropiinye_i_dr-88665.pdf
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / Шеннон К. – Москва : Иностран. лит., 1963. – 829 с.
4. Волков А.В. Энтропийные модели микро - и наноструктур: учеб.пособие / А.В. Волков, И.Н. Еремина, А.Г. Саноян. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 80 с.
5. L. von Bertalanffy, General System Theory — A Critical Review, «General Systems», vol. VII, 1962, p. 1—20
6. Митков А.Л., Кардашевский С.В. Статистические методы в сельхозмашиностроении. – М.: Машиностроение; София : Земиздат 1978. -360 с.
7. Василенко П. М., Погорелый Л. В. Основы научных исследований : механизация сельского хозяйства: [учеб. пособие для высш. с.-х. учеб. заведений] / П. М. Василенко, Л. В. Погорелый. – Киев : Вища школа, 1985. – 266 с.
8. Дональд Уилер, Дэвид Чамберс. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 410 с.
9. Камалетдинов Р.Р. Использование теории информации при имитационном моделировании процесса сепарации картофельного вороха [Текст] / Р.Р. Камалетдинов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – №11. – С. 8-10.
10. Камалетдинов Р.Р. Рекомендации по совершенствованию рабочих органов картофелеуборочных машин, 2-е издание. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – 44 с.
11. Potato in progress (science meets practice). Edited by: A.J.Haverkort, P.C.Struik. The Netherlands. Wageningen Academic Publishers. 2005. 366 p.

Сведения об авторах:

Камалетдинов Рим Рашитович – доктор технических наук, доцент, e-mail: krr53@mail.ru

Мударисов Салават Гумерович – доктор технических наук, профессор, e-mail: salavam@gmail.com
ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет, г.Уфа, Россия.

ENTROPY METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY AND STABILITY OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF AGRICULTURAL MACHINES

Kamaletdinov R.R., Mudarisov S.G.

Abstract. The article substantiates the methodology for evaluating the technological operations of agricultural machines, based on entropy indicators of quality and stability. The variants of its definition, based on graphical constructions and analytical calculations, are considered. The stability factors of individual operations in the cultivation and harvesting of potatoes are given. The compliance of the levels of agrotechnical requirements with the quality of performance of individual operations has been evaluated. The operations, that require further improvement of technologies and technical means for their implementation, are identified.

Key words: entropy, quality, stability, operation, potato, cultivation.

References

1. Barskiy L.A., Rubinshteyn Yu.B. *Kiberneticheskie metody v obogaschenii poleznykh iskopaemykh*. [Cybernetic methods in mineral processing]. / L. A. Barskiy, Yu. B. Rubinshteyn. - Moskva : Nedra, 1970. – P. 312.
2. Prangishvili I. V. *Entropiynye i drugie sistemnye zakonomernosti. Voprosy upravleniya slozhnyimi sistemami*. (Entropy and other systemic patterns. Management issues of complex systems). / I. V. Prangishvili; Institute of problem management named after V. A. Trapeznikova. – Moskva: Nauka, 2003. – 428 s. – Available at: http://apolovoleg.narod.ru/olderfiles/1/Prangishvili_I.V._JEntropiynye_i_dr-88665.pdf
3. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike*. [Works on information theory and cybernetics]. / Shannon K. – Moskva : Inostran. lit., 1963. – P. 829.
4. Volkov A.V. *Entropiynye modeli mikro - i nanostruktur: ucheb.posobie*. [Entropy models of micro - and nanostructures: study guide]. / A.V. Volkov, I.N. Eremina, A.G. Sanoyan - Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm, un-ta, 2007. – P. 80.
5. L. von Bertalanffy, General System Theory — A Critical Review, «General Systems», vol. VII, 1962, p. 1—20
6. Mitkov A.L., Kardashevskiy S.V. *Statisticheskie metody v selkhoz mashinostroenii*. [Statistical methods in agricultural engineering]. - M.: Mashinostroenie; Sofiya: Zemizdat 1978. –P. 360.
7. Vasilenko P. M., Pogorelyy L. V. *Osnovy nauchnykh issledovaniy: mekhanizatsiya selskogo khozyaystva: [ucheb. posobie dlya vyssh. s.-kh. ucheb. zavedeniy]*. [Basics of scientific research: agricultural mechanization: [studies for higher schools for agriculture]. / P. M. Vasilenko, L. V. Pogorelyy. - Kiev: Vishcha shkola, 1985. – P. 266.
8. Donald Uiler, David Chambers *Statisticheskoe upravlenie protsessami. Optimizatsiya biznesa s ispolzovaniem kontrolnykh kart Shukharta*. [Statistical management of process. Optimization of business using Shewhart control charts]. M.: Alpina Publisher, 2016. – P. 410.
9. Kamaletdinov R.R. Ispolzovanie teorii informatsii pri imitatsionnom modelirovanii protsessa separatsii kartofelnogo vorokha. [The use of information theory in the simulation of the separation process of potato heaps]. / R.R. Kamaletdinov // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva. - Mechanization and electrification of agriculture*. – 2006. – №11. – P. 8-10.
10. Kamaletdinov R.R. *Rekomendatsii po sovershenstvovaniyu rabochikh organov kartofeleuborochnykh mashin*. [Recommendations for the improvement of the working units of potato harvesting machines]. – Ufa: Bashkirskiy GAU, 2014. – P. 44. 2nd edition.
11. Potato in progress (science meets practice). Edited by: A.J.Haverkort, P.C.Struik. The Netherlands. Wageningen Academic Publishers. 2005. 366 p.

Authors:

Kamaletdinov Rome Rashitovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: krr53@mail.ru
Mudarisov Salavat Gumerovich – Doctor of Technical Sciences, professor, e-mail: salavam@gmail.com.
Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.