

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗА МАШИНЫ НА ВЕРОЯТНОСТЬ  
ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ В ОПТИМАЛЬНЫЕ СРОКИ  
И ПОТЕРИ УРОЖАЯ**

*Шевченко С. А.*

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
им. Петра Василенко

Представлены результаты математического моделирования влияния случайных процессов возникновения отказа и восстановления машины на урожайность растений. Приведены зависимости математического ожидания и коэффициента вариации потерь урожая от продолжительности технологической операции (при безотказной работе), оптимальных сроков её выполнения, интенсивности уменьшения коэффициента реализации биологического потенциала растений со временем и длительности восстановления машины после отказа.

*Ключевые слова:* растениеводство, машина, надежность, отказ, несвоевременность, потеря урожая, вероятность

Одним из способов повышения конкурентоспособности аграрных предприятий является управление рисками, сопутствующими производственной деятельности [1-4]. В связи с этим возникает необходимость учета не только средних значений основных показателей технологических процессов растениеводства (урожайность, затраты), но и их вариаций, обусловленных воздействием случайных факторов [1, 2].

Обобщающим показателем качества выполнения технологической операции является коэффициент реализации биологического потенциала (КРБП) растений [5]. Одним из случайных факторов, приводящих к уменьшению КРБП растений, являются отказы машин, приводящие к увеличению продолжительности их выполнения.

В работе [6] исследовано влияние отказов машин на численные характеристики потерь урожая при условии, что зависимость КРБП от времени являются монотонной или имеют точку экстремума. Однако для ряда культур и технологических операций имеются оптимальные сроки выполнения, в пределах которых время выполнения операции не оказывает существенного влияния на урожайность, а при превышении оптимального срока – используют линейную аппроксимацию зависимости потерь урожая от времени [7-11].

**Целью** данной работы является исследование влияния отказа машины на численные характеристики потерь урожая и вероятность выполнения технологической операции в оптимальные сроки.

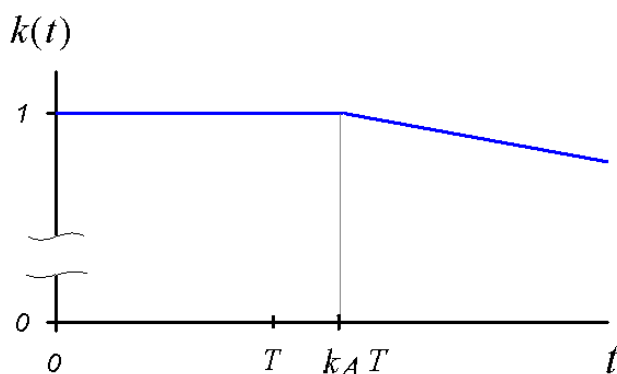
**Методика исследований.** Исследование выполнено путем математического моделирования случайных процессов возникновения отказа и восстановления машины. При этом учтено влияние части поля, обработанной до возникновения отказа, на потерю урожая.

Приняты следующие допущения: зависимость потерь от времени (при выходе за оптимальные сроки выполнения операции) является линейной; технологическая операция выполняется одной машиной; длительность восстановления машины распределена по экспоненциальному закону; при выполнении технологической операции может произойти не более одного отказа, существенно влияющего на ее продолжительность.

**Результаты исследования.** Определим числовые характеристики потерь урожая вследствие отказа машины. Будем использовать следующую аппроксимацию зависимости коэффициент реализации биологического потенциала растений от времени, (см. рис. 1):

$$k(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < k_A T \\ 1 - k_1(t - k_A T), & t \geq k_A T \end{cases}, \quad (1)$$

где  $k$  – мгновенное значение КРБП растений;  $t$  – время, с;  $k_1$  – интенсивность уменьшения КРБП растений,  $1/\text{с}$ ;  $k_A$  – отношение оптимального агротехнического срока выполнения операции и её длительности;  $T$  – продолжительность технологической операции при безотказной работе, с.



**Рис. 1.** Аппроксимация зависимости коэффициента реализации биологического потенциала растений от времени

Средний коэффициент реализации биологического потенциала растений определим, осуществляя усреднение по части площади поля, обработанной до наступления отказа, и продолжительностью восстановления машины:

$$\bar{k} = \int_0^1 \left( \int_0^{\tau_{\max}} \kappa(\varphi, \tau) f_{\tau}(\tau) d\tau \right) f_{\varphi}(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

де  $\bar{k}$  – средний КРБП растений при возникновении отказа;  $\kappa(\varphi, \tau)$  – КРБП растений при наличии отказа, характеризующегося определенными моментом возникновения и длительности восстановления машины;  $\varphi$  – часть площади поля, обработанная до наступления отказа;  $\tau$  – длительность восстановления машины, с;  $\tau_{\max}$  – предельная продолжительность восстановления машины, соответствующая потере урожая, с;  $f_{\tau}$  – плотность вероятности продолжительности восстановления машины,  $1/\text{с}$ ;  $f_{\varphi}$  – плотность вероятности части площади поля, обработанной до наступления отказа.

Принимая поток отказов стационарным, будем рассматривать распределение отказов как равномерное на интервале выполнения технологической операции. Продолжительность восстановления полагаем распределенной по экспоненциальному закону:

$$f_{\varphi}(\varphi) = 1, \quad (3)$$

$$f_{\tau}(\tau) = \mu e^{-\mu\tau}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – интенсивность восстановлений машины,  $1/\text{с}$ .

Если отказ произошел, то возможны следующие случаи:

– технологическая операция завершается в оптимальные сроки, что соответствует условию:

$$0 < \tau \leq (k_A - 1)T; \quad (5)$$

– срок завершения операции превысил оптимальный срок, причем восстановление машины завершается раньше этого срока, что соответствует условию:

$$(k_A - 1)T < \tau \leq (k_A - \varphi)T; \quad (6)$$

– срок завершения операции превысил оптимальный срок, причем восстановление машины завершается после этого срока, соответствует условию:

$$(k_A - \varphi) T < \tau \leq \tau_{\max} . \quad (7)$$

Таким образом, внутренний интеграл в (2) можно разделить на три части в соответствии с указанными случаями:

$$\bar{\kappa} = \int_0^1 \left( \int_0^{(k_A-1)T} \kappa_1(\varphi, \tau) f_\tau d\tau + \int_{(k_A-1)T}^{(k_A-\varphi)T} \kappa_2(\varphi, \tau) f_\tau d\tau + \int_{(k_A-\varphi)T}^{\tau_{\max}} \kappa_3(\varphi, \tau) f_\tau d\tau \right) f_\varphi d\varphi , \quad (8)$$

де  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – КРБП растений, соответствующий продолжительности восстановления определенной из определенного диапазона.

Определим зависимости КРБП растений, соответствующие указанным случаям.

В первом случае потери отсутствуют. Следовательно,

$$\kappa_1(\varphi, \tau) = 1 . \quad (9)$$

Во втором случае КРБП растений определим, осуществляя усреднение на интервалах выполнения операции:

$$\begin{aligned} \kappa_2(\varphi, \tau) &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{\varphi T} k(t) dt + \int_{\varphi T + \tau}^{k_A T} k(t) dt + \int_{k_A T}^{T + \tau} k(t) dt \right) = \\ &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{\varphi T} 1 dt + \int_{\varphi T + \tau}^{k_A T} 1 dt + \int_{k_A T}^{T + \tau} (1 - k_1(t - k_A T)) dt \right) . \end{aligned} \quad (10)$$

В третьем случае КРБП растений определим аналогично:

$$\begin{aligned} \kappa_3(\varphi, \tau) &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{\varphi T} k(t) dt + \int_{\varphi T + \tau}^{T + \tau} k(t) dt \right) = \\ &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{\varphi T} 1 dt + \int_{\varphi T + \tau}^{T + \tau} (1 - k_1(t - k_A T)) dt \right) . \end{aligned} \quad (11)$$

Преобразуем (8) с учетом (9-11):

$$\bar{\kappa} = 1 - \frac{k_1 e^{-k_A T \mu} (1 - (1 - T \mu) e^{T \mu})}{T^2 \mu^3} . \quad (12)$$

Определим средние потери КРБП растений вследствие отказа:

$$\mathbf{M}[\Delta \kappa] = 1 - \bar{\kappa} = \frac{k_1 e^{-k_A T \mu} (1 - (1 - T \mu) e^{T \mu})}{T^2 \mu^3} . \quad (13)$$

Перейдем к относительной величине средних потерь КРБП растений, осуществляя нормирование к безразмерному комплексу (соответствует потере КРБП растений при условии, что выполнение операции начинается в конце оптимального срока и происходит без отказов):

$$\varepsilon(k_A, T \mu) = \frac{\Delta \bar{\kappa}}{k_1 T} = \frac{e^{-k_A T \mu} (1 - (1 - T \mu) e^{T \mu})}{(T \mu)^3} \quad (14)$$

где  $\varepsilon$  – относительная потеря КРБП растений.

График зависимости (14) показан на рис. 2.

Определим коэффициент вариации потерь КРБП растений, используя соотношение между дисперсией и начальными моментами случайной величины:

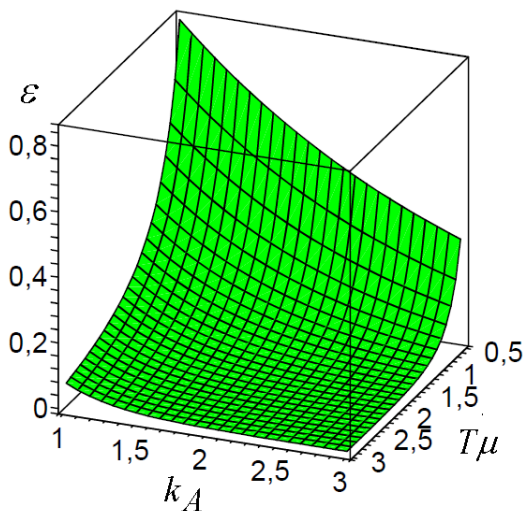
$$\mathbf{D}[\Delta \kappa] = \mathbf{D}[\kappa] = \mathbf{M}[\kappa^2] - (\mathbf{M}[\kappa])^2 , \quad (15)$$

$$\mathbf{M}[\kappa^2] = \int_0^1 \left( \int_0^{\tau_{\max}} \kappa^2(\varphi, \tau) f_\tau(\tau) d\tau \right) f_\varphi(\varphi) d\varphi , \quad (16)$$

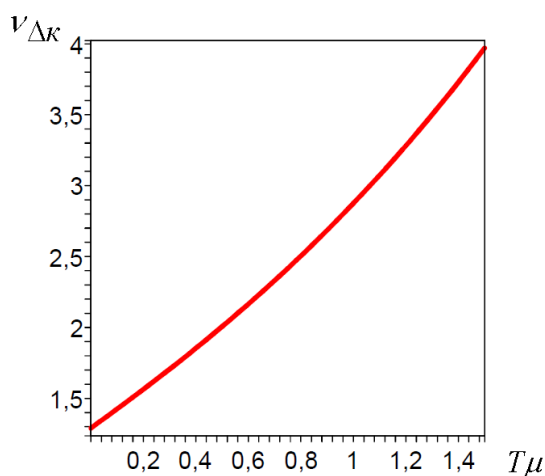
$$V_{\Delta\kappa} = \frac{\sqrt{D[\Delta\kappa]}}{M[\Delta\kappa]}, \quad (17)$$

где  $V_{\Delta\kappa}$  – коэффициент вариации потерь КРБП растений вследствие отказа.

График для определения коэффициента вариации потерь КРБП растений приведен на рис. 3.



**Рис. 2.** Зависимость относительной потери коэффициента реализации биологического потенциала растений от интенсивности восстановлений машины, продолжительности технологической операции и оптимального срока ее выполнения



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента вариации потерь КРБП растений от интенсивности обновлений машины и продолжительности технологической операции

Определим вероятности выполнения технологической операции в оптимальные сроки. Это возможно в следующих случаях: при выполнении операции не возникло ни одного отказа; при выполнении операции возник отказ, но время восстановления соответствует условию (5) и операция завершена в оптимальные сроки.

Следовательно,

$$P_{\text{opt}} = P_0 + P_1 P(\tau \leq (k_A - 1)T), \quad (18)$$

де  $P_{\text{opt}}$  – вероятность выполнения технологической операции в оптимальные сроки;  $P_0$  – вероятность безотказной работы машины;  $P_1$  – вероятность возникновения одного отказа;  $P$  – вероятность;

Согласно [12], при экспоненциальном распределении длительности восстановления,

$$P_0 = 1 - e^{-wT}, \quad (19)$$

$$P_1 = wT e^{-wT}, \quad (20)$$

$$P(\tau \leq (k_A - 1)T) = \int_0^{(k_A - 1)T} f_\tau(\tau) d\tau, \quad (21)$$

де  $w$  – параметр потока отказов,  $1/с$ .

Преобразуя (17) с учетом (18-20), получим:

$$P_{\text{opt}} = 1 - e^{-wT} (1 - wT(1 - e^{-\mu T(k_A - 1)})) . \quad (22)$$

**Выводы.** Получены зависимости математического ожидания и коэффициента вариации потерь урожая вследствие отказа машины при выполнении технологической операции, а также вероятности выполнения операции в оптимальные сроки. Полученные результаты могут использоваться для определения вероятности превышения потерей урожая допустимого значения вследствие отказов машин при выполнении технологических операций по методике, разработанной в [13].

#### Список использованных источников

1. Wetzstein M.E., A Case Study of Timeliness in the Selection of Risk-Efficient Machinery Complements / M.E. Wetzstein, W.N. Musser, R.W. McClendon, D.M. Edwards // Southern journal of agricultural economics. – 1990. – P. 165–177.
2. Cooke I.R., Empirical test of an agricultural landscape model: the importance of farmer preference for risk aversion and crop complexity / I.R. Cooke, E.H.A. Mattison, E. Audsley, A.P. Bailey, R.P. Freckleton, A.R. Graves, J. Morris, S.A. Queensborough, D.L. Sanders, G.M. Siriwardena, P. Trawick, A.R. Watkinson, W.J. Sutherland // Sage Open. – 2013. – № 3 (2). doi: 10.1177/2158244013486491
3. Кіндер М.В. Програмування урожайності, показників якості технологічних операцій і витрат / М.В. Кіндер, О.П. Слинко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка. – 2012. – № 124. – Т. 2.
4. Амеліна Ю.С. Управління ризиками у виробництві органічної овочево-ягідної продукції закритого ґрунту / Ю.С. Амеліна // Економіка. Управління. Інновації. – 2014. – № 1 (11).
5. Ковтун Ю. Реализация биопотенциала сельхозкультур как показатель уровня индустриального земледелия / Ю. Ковтун // Техника и технологии АПК. – 2012. – № 11 (38). – С. 31–35.
6. Шевченко С. Исследование влияния длительности восстановления машины на потери продукции растениеводства / С. Шевченко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Т. 15. – №7. – С. 40–44.
7. Пазова Т.Х. Особенности обоснования технических средств для противоэрозионной обработки почв / Т.Х. Пазова, Р.А. Балкаров, А.Х. Сохроков, М.П. Дохов, Х.А. Хамоков, С.А. Твердохлебов // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 79 (05). – С. 1–10.
8. Иванов Н. Влияние уровня надёжности машин на производство продукции растениеводства / Н. Иванов, А. Немцев, В. Коротких // Техніка і технології АПК. – 2013. – № 3. – С. 33–34.
9. Путрин А.С. Обоснование математической модели прогнозирования расчетной результирующей урожайности сельскохозяйственных культур с учетом механико-технологического состояния почвы / А.С. Путрин, В.Н. Варавва, С.В. Пчелинцев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 16–1. – Том 4. – С. 30–33.

10. Огнев О.Г. Математическая модель функционирования машинотракторного парка в условиях его дефицита / О.Г. Огнев // Весник ОГУ. – 2003. – № 1. – С. 122–123.
11. Пивовар П.В. Переваги та недоліки методичних підходів до формування МТП сільськогосподарських підприємств / П.В. Пивовар // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 1–2 (43). – Т. 2. – С. 13–23.
12. Надійність сільськогосподарської техніки [Підручник] / М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін та ін. За заг. ред. М. І. Черновола. – Кіровоград: КОД, 2010. – 320 с.
13. Шевченко С.А. Анализ влияния надежности машин технологического комплекса на вероятность выполнения производственного задания. / С.А. Шевченко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 30–36.

### References

1. Wetzstein ME, Musser WN, McClendon RW, Edwards DM. A Case Study of Timeliness in the Selection of Risk-Efficient Machinery Complements. *Southern journal of agricultural economics*. 1990: 165-177.
2. Cooke, IR, Mattison EHA, Audsley E, Bailey AP, Freckleton, RP, Graves AR, Morris J, Queensborough SA, Sanders DL, Siriwardena GM, et al. Empirical test of an agricultural landscape model: the importance of farmer preference for risk aversion and crop complexity. *Sage Open*. 2013. 3 (2). doi: 10.1177/2158244013486491
3. Kinder N., Slynko O. Programming productivity, quality process operations and waste Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2012. 124 (2).
4. Amelina I. Risk management in the production of organic vegetables and berries in greenhouses *Economy. Management. Innovation*. 2014. 1 (11).
5. Kovtun Yu. Implementation of biocapacity crops as an indicator of the level of industrial agriculture. *Engineering and technology AIC*. 2012. 11(38): 31–35.
6. Shevchenko S. Investigation of influence of recovery machine duration on loss of plant grounding. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2013. 15(7): 40-44.
7. Pazova TH, Balkarov RA, Sohrokov AH, Dohov MP, Hamokov HA, Tverdokhlebov SA. Features of substantiation of means for antierosion processing of soils. *Scientific journal of KSAU*. 2012. 79(05): 1-10.
8. Ivanov N, Nemtsev A, Corotkih V. Influence level of reliability of cars on crop production. *Engineering and technology AIC*. 2013. 3:33-34.
9. Putrin AS, Barabbas VN, Pchelintcev SV. Validity of the mathematical forecasting model of rated total farm crops yields adapted to mechanical and technological soil conditions. *Journal of Orenburg State Agrarian University*. 2007. 4(16-1): 30-33.
10. Ognev OG A mathematical model of the functioning of machines and tractors park in terms of its deficit. *Bulletin OSU*. 2003. 1: 122-123.
11. Pivovar PV Advantages and disadvantages of methodological approaches to the formation of the farm. *Bulletin ZNAU*. 2014. 1–2 (43): 13-23.
12. Chernovol MI, Cherkun VY, Aulin VV. Reliability agricultural machinery [textbook]. Kirovohrad: KOD. 2010. 320.
13. Shevchenko SA. The analysis of influence of reliability of machines of the technological complex on probability of performance of the production task. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Suhogo*. 2010. 4: 30–36.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДМОВИ МАШИНИ НА ЙМОВІРНІСТЬ ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ В ОПТИМАЛЬНІ ТЕРМІНИ І ВТРАТИ ВРОЖАЮ

*Шевченко С. А.*

Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. Петра Василенка.

*Ключові слова:* рослинництво, машина, надійність, відмова, несвоєчасність,  
втрата врожаю, імовірність

Представлено результати математичного моделювання впливу випадкових процесів виникнення відмови і відновлення машини на врожайність рослин. Наведено залежності математичного сподівання та коефіцієнту варіації втрат урожаю від тривалості технологічної операції (при безвідмовній роботі), оптимальних строків її виконання, інтенсивності зменшення коефіцієнта реалізації біологічного потенціалу рослин з часом та тривалості відновлення машини після відмови,

Для підвищення конкурентноздатності аграрних підприємств всі частіше застосовують керування ризиками. Отже, необхідно визначати не тільки середні значення основних показників технологічних процесів рослинництва (урожайність, витрати), але й їхні варіації, обумовлені випадковими факторами. Одним з таких випадкових факторів є відмови машин, що приводять до збільшення тривалості технологічних операцій і зменшення коефіцієнта реалізації біологічного потенціалу рослин.

**Метою** даної роботи є дослідження впливу відмови машини на чисельні характеристики втрат урожаю та імовірність виконання технологічної операції в оптимальний термін.

**Методика.** Дослідження виконані шляхом математичного моделювання випадкових процесів виникнення відмови й відновлення машини. При цьому враховано вплив частини поля, обробленої до виникнення відмови, на втрату врожаю. Дослідження виконані при наступних обмеженнях: залежність втрат врожаю від часу (при виході за оптимальні строки виконання операції) є лінійною; тривалість відновлення машини апроксимується експонентним законом розподілення; при виконанні технологічної операції може відбутися не більше однієї відмови.

**Результати.** Отримано залежності математичного сподівання втрат урожаю і відповідного коефіцієнта варіації від тривалості технологічної операції, оптимальних строків її виконання, інтенсивності втрат урожаю, тривалості відновлення машини, Математичне сподівання втрат урожаю є функцією від двох безрозмірних комплексів: добутку тривалості технологічної операції та інтенсивності відновлення машини; добутку тривалості технологічної операції та інтенсивності втрат урожаю. Коефіцієнт варіації втрат урожаю залежить лише від першого із зазначених комплексів; його мінімальне значення становить 1,3.

**Висновки.** Отримані результати можуть використатися для визначення ймовірності перевищення втратою врожаю допустимого значення внаслідок відмов машин при виконанні технологічних операцій.

# STUDY OF THE INFLUENCE OF MACHINE FAILURE ON PROBABILITY OF TECHNICAL OPERATION PERFORMANCE WITHIN A REASONABLE TIME AND CROP LOSSES

*Shevchenko S.A.*

Kharkiv National Technical University of Agriculture nd. a Petro Vasylenko

*Keywords: crop, machine, reliability, failure, loss of crops, probability*

The results of mathematical modeling of the influence of random processes of machine failure and repair on crop are presented. There are given dependencies of the expected value and variation coefficient of crop losses on duration of technical operation (during failure-free operation), reasonable time of its performance, decrease rate of realization coefficient of biological potential of plants in the course of time and machine repair rate after failure.

Risk management is applied more often in order to increase competitive advantage of agricultural enterprises. Consequently, one should define not only average values of basic indexes of technical processes of plant cultivation (crop capacity, expenses), but also their variations, conditioned by random factors.

One of such random factors is machine failure, resulting in increase of duration of technical operations and decrease of realization coefficient of biological potential of plants.

**Objective** of this study is to study the influence of machine failure on multiple characteristics of crop losses and probability of technical operation performance within a reasonable time.

**Methodology.** The study is conducted using mathematical modeling of random processes of machine failure and repair. At the same time, we have considered the influence of the part of a field, which had been harvested before failure, on crop losses.

The study is made within the following limitations: dependence of losses on time (output within a reasonable time of operation performance) is linear; exponential failure law approximates duration of machine repair; no more than one failure may happen during technical operation performance.

**Results.** There have been obtained dependencies of the expected value of crop losses and their variation coefficient on duration of technical operation, reasonable time of its performance, crop losses rate, and duration of machine repair.

The expected value of crop losses is a function of two dimensionless numbers: product of duration of technical operation and machine repair rate; product of duration of technical operation and crop losses rate.

Variation coefficient of crop losses depends only on the first of the above mentioned numbers; its minimal value is 1,3.

**Summary.** The obtained results can be used to define probability of exceeding the acceptable value of crop losses owing to machine failure during technical operations performance.