

УДК 631.3:62-192

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ**

**С. А. ШЕВЧЕНКО**

*Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства имени П. Василенко, Украина*

### **Введение**

Технологические процессы в промышленности, транспорте, связи и сельском хозяйстве состоят из многих операций, выполняемых с помощью комплексов машин. Обслуживание машин по техническому состоянию на основе результатов диагностирования является эффективным средством повышения надежности и снижения эксплуатационных расходов [1]–[4].

Исследования надежности ориентированы преимущественно на машины, отказ которых приводит лишь к приостановке выпуска продукции до восстановления машины [4]–[6]. Также значительное внимание уделяется расчету показателей надежности систем, отказы которых приводят к авариям и катастрофам [7].

При выполнении многих работ простои из-за отказов машин приводят к безвозвратной потере части продукции или уменьшению другого полезного эффекта. Например, отказы сельхозмашин приводят к потерям продукции, поскольку урожайность сельскохозяйственных культур зависит от сроков выполнения технологических операций. Такие комплексы из нескольких машин, отказы каждой из которых приводят к потере части продукции, менее исследованы [8]–[10].

В [8] получены выражения для расчета вероятности безотказной работы технологических комплексов на протяжении заданного времени и их коэффициента готовности. В [9] разработана методика и осуществлено компьютерное имитационное моделирование выполнения технологического процесса комплексами машин, которые отличаются, в частности, надежностью. В [10] получена зависимость коэффициента эксплуатационной надежности комплекса машин в зависимости от их надежности при различном количестве машин в ненагруженном резерве.

Анализ работ [8]–[10] показал, что исследования преимущественно направлены на определение коэффициентов готовности и технического использования машин. Но эти коэффициенты характеризуют машины и системы их технического обслуживания безотносительно к поставленным задачам. Для предприятия же важен анализ их пригодности для решения производственных задач в конкретных условиях на основе оценивания возможных потерь продукции вследствие отказов (с учетом затрат, обусловленных принятой системой технического обслуживания [6]).

Цель статьи – определение вероятности недопустимых потерь продукции вследствие отказов машин при выполнении технологических операций (на примере технологических процессов растениеводства).

**Выбор показателя, характеризующего потери продукции вследствие отказов**

Важнейшим показателем является математическое ожидание потерь продукции; в растениеводстве потери характеризуются снижением коэффициента реализации биологического потенциала (КРБП) растений. Если наработка машин при выполнении операций значительно превышает наработку на отказ, то существенное отклонение потерь времени от среднего значения маловероятно и, следовательно, достаточно определить лишь математическое ожидание потерь продукции. Поскольку надежность и производительность машин возрастают, то наработка машины при выполнении операции зачастую меньше или сравнима с наработкой на отказ. В этом случае даже единичные сложные отказы могут существенно увеличить продолжительность работ и привести к неприемлемым потерям продукции (в этом случае производственная задача считается невыполненной). Поэтому, с учетом рекомендаций [11], следует также определять и вероятность выполнения задания (вероятность того, что потери не превзойдут допустимое значение).

**Определение вероятностных характеристик потерь продукции при выполнении технологической операции**

Поскольку потери продукции происходят при выполнении каждой из операций, то для отдельной операции нецелесообразно задавать их предельное значение. Поэтому при выводе аналитических зависимостей в данном подразделе используется граничное значение потерь, являющееся, по сути, вспомогательной величиной (для которой не требуется задавать численное значение).

Вероятность превышения некоторого граничного значения потерями продукции определим, суммируя произведения вероятностей следующих событий: при выполнении операции произошли один или несколько отказов; потери времени на восстановление машины после отказов привели к превышению граничной потери продукции. При этом поток отказов рассматриваем как поток Пуассона [12] (что не противоречит [13]):

$$P_{np}(\Delta\kappa_{гр}) = \sum_{k=1}^{\infty} [p(T, k) p_k(\Delta\kappa_{гр})] = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} \cdot p_k(\Delta\kappa_{гр}) \right], \quad (1)$$

где  $P_{np}$  – вероятность того, что потери продукции вследствие отказов превзойдут граничное значение;  $\Delta\kappa_{гр}$  – граничная потеря продукции;  $k$  – количество отказов;  $T$  – наработка машины, с;  $p(T, k)$  – вероятность возникновения ровно  $k$  отказов при выполнении операции;  $p_k$  – вероятность того, что потери времени на восстановление машины после  $k$  отказов привели к превышению граничной потери продукции;  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $1/с$ .

Для многих технологических операций (в частности – в растениеводстве) зависимость потерь продукции от времени аппроксимируют линейной зависимостью [8]. Определим КРБП растений при выполнении операции при отсутствии отказов (потери обусловлены лишь конечной производительностью машин):

$$\kappa_0 = \frac{1}{T} \int_0^T (1 - k_1 t) dt = 1 - \frac{k_1 T}{2}, \quad (2)$$

где  $\kappa_0$  – КРБП растений при отсутствии отказов при выполнении операции;  $t$  – время с начала операции;  $k_1$  – коэффициент пропорциональности в линейной зависимости уменьшения КРБП растений от времени, 1/с.

Принимая интенсивность отказов и восстановлений постоянными, определим граничную суммарную продолжительность восстановлений:

$$\tau_{\text{гр}} = 2 \Delta\kappa_{\text{гр}} / k_1, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{гр}}$  – граничная продолжительность восстановлений, с.

Как и при исследовании надежности систем с использованием метода марковских случайных процессов, примем, что продолжительность восстановлений распределена по показательному закону. Воспользуемся тем, что плотность вероятности суммы случайных величин, распределенных по показательному закону, имеет гамма-распределение, и определим вероятность того, что потери продукции вследствие отказов машины превзойдут граничное значение:

$$p_k = p\left(\sum_{i=1}^k \tau_i \geq \tau_{\text{гр}}\right) = 1 - F_{\Gamma}(\tau_{\text{гр}}, k, \mu); \quad (4)$$

$$P_{\text{пр}}(\Delta\kappa_{\text{гр}}) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} \left(1 - F_{\Gamma}(\tau_{\text{гр}}(\Delta\kappa_{\text{гр}}), k, \mu)\right) \right], \quad (5)$$

где  $\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го восстановления, с;  $F_{\Gamma}$  – функция гамма-распределения;  $\mu$  – интенсивность восстановлений, 1/с.

При применении (5) целесообразно учитывать конечное количество отказов. Ставя в соответствие слагаемым в (5) заведомо большие элементы бесконечной геометрической прогрессии, получим уравнение для определения количества отказов  $n$ , которые необходимо учитывать для того, чтобы погрешность вычисления по формуле (5) не превзошла  $\Delta P$ :

$$\Delta P < e^{-\lambda T} \frac{(\lambda T)^{n+1}}{(n+1)!} \frac{1}{1 - (\lambda T)/(n+2)}. \quad (6)$$

Определим вероятность события, альтернативного (5):

$$P_{\text{нпр}}(\Delta\kappa_{\text{гр}}) = 1 - P_{\text{пр}}(\Delta\kappa_{\text{гр}}), \quad (7)$$

где  $P_{\text{нпр}}$  – вероятность того, что потери продукции (уменьшение КРБП растений) при выполнении технологической операции не превзойдут граничное значение.

Таким образом, (7) описывает функцию распределения потерь продукции (КРБП растений) при выполнении операции. Определим их плотность вероятности:

$$f_n(\Delta\kappa) = \frac{dP_{\text{нпр}}(\Delta\kappa)}{d(\Delta\kappa)}, \quad (8)$$

где  $f_n$  – плотность вероятности потерь КРБП растений при выполнении операции.

Определим математическое ожидание и дисперсию потерь продукции (КРБП растений) при выполнении операции:

$$\mathbf{M}(\Delta\kappa) = \int_0^1 f_{\Pi}(\Delta\kappa) (\Delta\kappa) d(\Delta\kappa); \quad (9)$$

$$\mathbf{D}(\Delta\kappa) = \int_0^1 (\Delta\kappa - \mathbf{M}(\Delta\kappa))^2 f_{\Pi}(\Delta\kappa) d(\Delta\kappa). \quad (10)$$

Перейдем от потерь к вероятностным характеристикам получения продукции:

$$\kappa = \kappa_0 - \Delta\kappa, \quad (11)$$

где  $\kappa$  – КРБП растений в условиях отказов;  $\Delta\kappa$  – потеря продукции (уменьшение КРБП растений).

Определим математическое ожидание и дисперсию КРБП растений при выполнении операции с учетом (11):

$$\mathbf{M}(\kappa) = \kappa_0 - \mathbf{M}(\Delta\kappa); \quad (12)$$

$$\mathbf{D}(\kappa) = \mathbf{D}(\Delta\kappa). \quad (13)$$

**Определение математического ожидания и дисперсии выпуска продукции по результатам технологического процесса**

Исследуем влияние случайных отказов при выполнении отдельных операций на выпуск продукции по результатам технологического процесса в целом. Для этого воспользуемся мультипликативной формой представления зависимости КРБП растений по результатам технологического процесса от соответствующих коэффициентов при выполнении операций. При этом будем учитывать только коэффициенты, зависящие от продолжительности технологических операций:

$$\kappa_{\text{ТП}} = \prod_{i=1}^{N_{\text{от}}} (\kappa_i), \quad (14)$$

где  $\kappa_{\text{ТП}}$  – КРБП растений по результатам технологического процесса, зависящий от продолжительности технологических операций;  $i$  – номер технологической операции;  $N_{\text{от}}$  – количество операций в технологическом процессе;  $\kappa_i$  – КРБП растений при выполнении  $i$ -й технологической операции, зависящий от ее продолжительности.

Логарифмируя (14), получим:

$$\ln \kappa_{\text{ТП}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{от}}} \ln \kappa_i. \quad (15)$$

Таким образом, логарифм КРБП растений по результатам технологического процесса (8) является суммой многих случайных величин. Рассмотрим типичную в растениеводстве ситуацию, когда задержки при выполнении любой технологической операции не приводят к задержке начала следующей операции. Тогда логарифмы

КРБП растений при выполнении отдельных операций независимы. Это позволяет рассматривать случайную величину (15) как распределенную по нормальному закону. Следовательно, КРБП растений по результатам технологического процесса распределен по логарифмически нормальному закону.

Определив математическое ожидание и дисперсию КРБП растений для отдельных технологических операций (9), (10), вычислим соответствующие моменты для КРБП по результатам технологического процесса, используя теоремы о числовых характеристиках произведения случайных величин, а также определим коэффициент вариации КРБП растений:

$$\mathbf{M}(\kappa_{\text{ТП}}) = \prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} \mathbf{M}(\kappa_i); \quad (16)$$

$$\mathbf{D}(\kappa_{\text{ТП}}) = \prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} (\mathbf{D}(\kappa_i) + \mathbf{M}^2(\kappa_i)) - \prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} \mathbf{M}^2(\kappa_i); \quad (17)$$

$$\nu_{\text{ТП}}^2 = \frac{\mathbf{D}(\kappa_{\text{ТП}})}{\mathbf{M}^2(\kappa_{\text{ТП}})} = \frac{\prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} (\mathbf{D}(\kappa_i) + \mathbf{M}^2(\kappa_i))}{\prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} \mathbf{M}^2(\kappa_i)} - 1 = \prod_{i=1}^{N_{\text{OT}}} (\nu^2(\kappa_i) + 1) - 1, \quad (18)$$

где  $\nu_{\text{ТП}}$  – коэффициент вариации КРБП растений по результатам технологического процесса.

Из (18) следует, что коэффициент вариации КРБП растений по результатам технологического процесса превосходит наибольший из коэффициентов вариации для технологических операций, что подтверждает целесообразность анализа пригодности технологического комплекса для решения производственной задачи на основе определения вероятности её выполнения.

#### **Определение вероятности выполнения производственного задания**

Определим вероятность того, что выпуск продукции (КРБП растений) по результатам технологического процесса окажется не меньшим, чем заданное допустимое значение (т. е. вероятность невыполнения производственного задания):

$$p_{\text{ТП}} = 1 - F_{\text{ЛН}}(\mathbf{M}(\kappa_{\text{ТП}}), \mathbf{D}(\kappa_{\text{ТП}}), \kappa_{\text{min}}), \quad (19)$$

где  $p_{\text{ТП}}$  – вероятность того, что КРБП растений по результатам технологического процесса окажется не меньшим, чем допустимое значение;  $F_{\text{ЛН}}$  – функция логарифмически нормального распределения;  $\kappa_{\text{min}}$  – минимально-допустимое значение КРБП растений по результатам технологического процесса.

Таким образом, (19) позволяет вычислить вероятность выполнения производственного задания в условиях отказов машин технологического комплекса. Если эта вероятность превышает заданное пороговое значение, то комплекс машин соответствует производственному заданию.

### Заключение

На основе учета влияния отказов машин на потери продукции разработана новая методика определения соответствия технологических комплексов машин производственному заданию. Решение принимается по результатам вычисления вероятности того, что выпуск продукции будет большим, чем минимально-допустимое значение, и сравнения этой вероятности с пороговым значением.

Разработанная методика может использоваться в растениеводстве и других отраслях, где простои машин приводят к потерям продукции или уменьшению другого полезного эффекта. Результаты вероятностных расчетов по этой методике могут использоваться при совершенствовании систем технического обслуживания машин (в частности – при переходе к обслуживанию по техническому состоянию). Ограничением данной методики является выполнение каждой операции единственной машиной.

### Литература

1. Максименко, А. Н. Диагностика строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин : учеб. пособие / А. Н. Максименко, Г. Л. Антипенко, Г. С. Лягушев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. – 302 с.
2. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 252 с.
3. Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Technical Manual 5-698-2. –Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2006. – 96 p. ([www.army.mil/usapa/eng/DR\\_pubs/dr\\_a/pdf/tm5\\_698\\_2.pdf](http://www.army.mil/usapa/eng/DR_pubs/dr_a/pdf/tm5_698_2.pdf)).
4. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – Москва : Логос, 2001. – 208 с.
5. Матвеевский, В. Р. Надежность технических систем / В. Р. Матвеевский. – Москва : МГИЭМ, 2002. – 113 с.
6. ReliaSoft Corp. Economical Life Model for Repairable Systems / Reliability HotWire. – 2006. – № 6 (<http://www.weibull.com/hotwire/issue64/relbasics64.htm>).
7. Костерев, В. В. Надежность технических систем и управление риском / В. В. Костерев. – Москва : МИФИ, 2008. – 280 с.
8. Безотказность и надежность технологических комплексов / В. Я. Анилович [и др.] // Вестн. ХГТУСХ. Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин. – 1996. – С. 20–25.
9. Пастухов, В. І. Обґрунтування оптимальних комплексів машин для механізації польових робіт : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / В. І. Пастухов ; ХНТУСГ. – Харків, 2006. – 38 с.
10. Грачев, Р. Ю. Повышение эффективности эксплуатации машин технологического комплекса методом частичного резервирования (на примере культуртехнических работ) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Р. Ю. Грачев ; Моск. гос. ун-т природообустройства. – Москва, 2007. – 18 с.

11. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет : В. С. Авдеевский (пред.) [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – Москва : Машиностроение, 1988. – Т. 3. Эффективность технических систем. – 328 с.
12. Надійність сільськогосподарської техніки : підручник / М. І. Чорновол [та ін.] ; за заг. редакцією М. І. Чорновола. – Кіровоград : КОД, 2010. – 320 с.
13. Hacker L. Limitations of the Exponential Distribution for Reliability Analysis / Reliability Edge. – 2001. – № 3. – P. 1–3.

*Получено 08.07.2010 г.*