

УДК 330.131.7:631.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-29-32

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

канд. техн. наук Ал-й Л. МИСУН, А.В. ГАРКУША
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Выполнен логистический регрессионный анализ производственных рисков при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники (на примере кормоуборочных комбайнов). Рассмотрено логит-преобразование риска как одномерной величины, описываемой вероятностью, проведено табулирование полученных зависимостей.

Ключевые слова: вероятность, логистический регрессионный анализ, производственный риск, эксплуатация, мобильная сельскохозяйственная техника.

Введение. Анализ ранее проведенных исследований [1–4] позволил установить, что на долю мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) приходится свыше 80% случаев производственного травматизма, а наибольшие простои МСХТ имеют место при устранении эксплуатационных отказов. Для обоснования факторов производственного риска при эксплуатации МСХТ использовался статистический метод с программным комплексом «STATISTICA 6.0» [5]. Достоверность полученных результатов оценивалась методом сравнения среднеарифметических и относительных значений эмпирических совокупностей [6]. За достоверный принимался результат, когда степень вероятности безошибочного прогноза составляла не менее 95%, что соответствует $P < 0,05$ [7]. Взаимосвязь между факторами производственного риска и его негативными последствиями (отказом кормоуборочного комбайна и его простоем) определялась посредством парной корреляции. Величина коэффициента корреляции ($r = 1,0 \dots 0,1$) служила показателем силы связи между изучаемыми признаками. Достоверность коэффициента корреляции рассчитывалась по критерию Стьюдента [8; 9].

Основная часть. Результаты предварительного анализа эксплуатации МСХТ позволили выделить (на примере кормоуборочных комбайнов) наиболее характерные факторы, влияющие на производственный риск (количество текущих ремонтов по устранению отказов 2-й и 3-й групп сложности, ремонтов с применением сварки, срок эксплуатации и др.), связанные с техническим состоянием комбайнов, а также факторы риска, обусловленные негативным влиянием изменяющейся природно-техногенной среды при эксплуатации кормоуборочных комбайнов. Для обоснования связи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной непрерывного типа был выбран метод логистического регрессионного анализа [6; 10]. Применительно к рассматриваемой задаче роль предикторов выполняют факторы риска, а в качестве зависимой переменной выступает вероятность. Использование программного комплекса «STATISTICA 6.0» [5] позволило выполнить логит-преобразование риска как одномерной величины, описываемой вероятностью (зависимости (1)–(3)):

- риск отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(1,54 + (-0,47)x_1)}{(1 + \exp(1,54 + (-0,47)x_1))}, \quad (1)$$

(хи-квадрат = 24,98; $p \leq 0,001$),

где x_1 – количество проведенных текущих ремонтов за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна;

- риск отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(0,32 + (-0,35)x_1)}{(1 + \exp(0,32 + (-0,35)x_1))}, \quad (2)$$

(хи-квадрат = 15,35; $p \leq 0,001$),

- риск отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна:

$$P = \frac{\exp(-0,29 + 0,24x_2)}{(1 + \exp(-0,29 + 0,24x_2))}, \quad (3)$$

(хи-квадрат = 24,76; $p \leq 0,001$),

где x_2 – количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна.

Табуляция зависимостей (1–3) представлена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Зависимость риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна от количества текущих ремонтов

Риск возникновения отказов P , %	Количество текущих ремонтов кормоуборочного комбайна N_T									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	81,75	73,34	64,26	51,28	40,82	28,90	19,46	12,95	8,26	5,28
Приборы и устройства безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна	56,23	48,41	39,74	31,80	25,68	18,92	14,22	9,39	6,18	4,25

Таблица 2. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от количества ремонтов с применением сварки

Риск возникновения отказов P , %	Количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна N_c												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	18,3	47,84	53,8	58,41	64,77	70,29	75,03	78,70	83,30	86,12	88,23	91,17	92,96

Условия эксплуатации кормоуборочного комбайна и связанные с этим факторы риска, прежде всего, обусловлены режимом его работы. Проведенный нами статистический анализ позволил получить соответствующие зависимости вероятности как количественной меры риска с действием различных факторов:

– риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году:

$$P = \frac{\exp(-0,69 + 0,14x_p)}{(1 + \exp(-0,69 + 0,14x_p))}, \quad (4)$$

(хи-квадрат = 18,75; $p \leq 0,001$),

где x_p – продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году;

– риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году:

$$P = \frac{\exp(0,81 + 0,21x_p)}{(1 + \exp(0,81 + 0,21x_p))}, \quad (5)$$

(хи-квадрат = 14,18; $p \leq 0,001$).

Для удобства практического использования полученных результатов (выражения (4)–(5)) выполнена табуляция расчетных зависимостей, результаты которой представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, механизмов и элементов привода его рабочих органов от продолжительности работы комбайна в году

Риск возникновения отказов P , %	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.					
	1	25	50	100	150	200
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	14,45	33,42	36,81	42,13	52,84	64,73
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	27,42	71,30	78,00	81,24	84,22	86,12

Используемый метод регрессионного анализа также позволяет получить зависимости для расчета риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна при совместном действии двух факторов риска.

Например:

– риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный фактическим режимом его эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 4):

$$P = \frac{\exp(0,94 + 0,005x + 0,16y)}{(1 + \exp(0,94 + 0,005x + 0,16y))}, \quad (6)$$

(хи-квадрат = 13,20; $p \leq 0,001$),

где y – режим эксплуатации кормоуборочного комбайна: с подборщиком (первый), жаткой для уборки трав (второй), жаткой для уборки высокостебельных культур (третий),

Таблица 4. – Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	17	63	76	80	85	86
	Второй	22	67	79	82	87	89
	Третий	24	71	83	85	90	92
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 5):

$$P = \frac{\exp(0,30 + 0,0005x + 0,15y)}{(1 + \exp(0,30 + 0,0005x + 0,15y))}, \quad (7)$$

(хи-квадрат = 16,84; $p \leq 0,001$),

Таблица 5. – Зависимость риска возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	12	61	61	73	75	79
	Второй	16	63	66	78	78	83
	Третий	19	67	70	80	84	85
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 6):

$$P = \frac{\exp(-0,06 + 0,0008x_p + 0,14y)}{(1 + \exp(-0,06 + 0,0008x_p + 0,14y))}, \quad (8)$$

(хи-квадрат = 10,57; $p \leq 0,001$),

Таблица 6. – Зависимость риска возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	17	46	48	49	54	56
	Второй	19	49	52	52	58	59
	Третий	22	56	55	57	61	62
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

– риск возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 7):

$$P = \frac{\exp(-2,97 + 0,002x_p + 0,30y)}{(1 + \exp(-2,97 + 0,002x_p + 0,30y))}, \quad (9)$$

(хи-квадрат = 105,19; $p \leq 0,001$).

Таблица 7. – Зависимость риска возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Риск возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, %						
	Первый	6	18	28	36	51	66
	Второй	8	26	36	48	63	84
	Третий	11	33	46	60	81	92
	1	25	50	100	150	200	
Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году N_T , дн.							

Приведенные таблицы (1–7), содержащие табулированные значения риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна, обусловленных действием разных факторов и их сочетаний, позволяют не только произвести количественную оценку риска, но и упростить осуществление контроля расчетных значений различных его видов.

Заключение. По результатам проведенных исследований разработано математическое описание расчета производственных рисков при эксплуатации МСХТ (на примере кормоуборочных комбайнов), основанное на использовании метода логистического регрессионного анализа и включающее разработку и табулирование полученных зависимостей по рассматриваемым видам риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организационно-технические мероприятия для повышения безопасности и улучшения условий труда операторов мобильной сельскохозяйственной техники / Л.В. Мисун, В.А. Агейчик, А.Л. Мисун и др. – Минск: БГАТУ, 2012. – 192 с.
2. Мисун А.Л. Прогнозируемая травмоопасность при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2016. – № 3. – С. 179–185.
3. Орда А.Н., Мисун А.Л. Исследование безопасности и эффективности функционирования технологической системы «оператор–комбайн–транспорт» на уборке кормовых культур // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2023. – № 1(130). – С. 91–94. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-130-1-91-94
4. Мисун Л.В., Мисун Ал-й Л., Мисун Ал-р Л. Техносферная безопасность: пособие. – Минск: БГАТУ, 2023. – 212 с.
5. Реброва О.Ю. Статистический анализ данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. – М.: Медиа Сфера, 2003. – 312 с.
6. Пушенко С.Л. Структура методологии управления рисками в повышении эффективности организации охраны труда на предприятиях стройиндустрии // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 161–165.
7. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. В 2 т.: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1980. – Т. 1: Методы обработки данных. – 610 с.
8. Петри А., Сабин К. Наглядная медицинская статистика / пер. с англ. В.П. Леонова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2003. – 141 с. – (Экзамен на отлично).
9. Леонов А.Н., Дечко М.М., Ловкис В.Б. Основы научных исследований и моделирования. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
10. Владимиров В.А., Малинецкий Г.Г., Махутов Н.А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. – 432 с.

REFERENCES

1. Misun, L.V., Ageichik, V.A., Misun, A.L., Gurina, A.N. & Misun, A.L. (2012). *Organizatsionno-tekhnicheskie meropriyatiya dlya povysheniya bezopasnosti i uluchsheniya uslovii truda operatorov mo-bil'noi sel'skokhozyaistvennoi tekhniki*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
2. Misun, A.L. (2016). Prognoziruemaya travmoopasnost' pri vosstanovlenii rabotosposobnosti kormouborochnykh kombainov [The Predicted Injury Risk at Maintenance of Forage Harvesters]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 179–185. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Orda, A. N. & Misun, A.L. (2023). Issledovanie bezopasnosti i effektivnosti funktsionirovaniya tekhnologicheskoi sistemy «operator–kombain–transport» na uborkе kormovykh kul'tur [Study of the Safety and Efficiency of the Functioning of the Technological System "opeRator–Harvester–Transport" in Forage Crops Harvesting]. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskie nauki [Vestnik of BarSU. Series Technical science]*, 1(130), 91–94. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Misun, L.V., Misun, Al-i L. & Misun, Al-r L. (2023). *Tekhnosfernaya bezopasnost': posobie*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
5. Rebrova, O.Yu. (2003). *Statisticheskii analiz dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA*. Moscow: Media Sfera. (In Russ.).
6. Pushenko, S.L. (2012). Struktura metodologii upravleniya riskami v povyshenii effektivnosti organizatsii okhrany truda na predpriyatiyakh stroindustrii. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, (1), 161–165. (In Russ.).
7. Dzhonson, N. & Lion, F. (1980). *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke [Statistics and Experimental Design in Engineering and Physical Science]*. V 2 t.: [per. s angl.]. T. 1: *Metody obrabotki dannykh [Data Processing Methods]*. Moscow: Mir. (In Russ.).
8. Petri, A. & Sabin, K. (2003). *Naglyadnaya meditsinskaya statistika [Visual medical statistics]* [per. s angl. V.P. Leonova]. Moscow: GEOTAR-Media. (In Russ.).
9. Leonov, A.N., Dechko, M.M. & Lovkis, V.B. (2010). *Osnovy nauchnykh issledovaniy i modelirovaniya*. Minsk: BGATU. (In Russ.).
10. Vladimirov, V.A., Malinetskii, G.G. & Makhutov, N.A. *Upravlenie riskom: Risk. Ustoichivoe razvitie. Sinergetika*. Moscow: Nauka. (In Russ.).

Поступила 12.03.2024

FORECASTING PRODUCTION RISKS WHEN USING MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY

Al-I MISUN, A. GARKUSHA
(Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk)

A logistic regression analysis of production risks during the operation of mobile agricultural machinery (using forage harvesters as an example) was performed. The logit transformation of risk as a one-dimensional value described by probability was considered, and the resulting dependencies were tabulated.

Keywords: probability, logistic regression analysis, production risk, operation, mobile agricultural machinery.