

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

А.Ю. Русин

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Русин А.Ю., 2020

Аннотация. Отмечено, что совершенствование материалов и технологий приводит к повышению надежности электрооборудования. Показано, что при этом возрастает время испытаний новых образцов оборудования на надежность и увеличиваются затраты на их проведение. Даны результаты исследований, позволивших сократить время проведения испытаний оборудования на надежность.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, испытания на надежность, электрооборудование, цензурированные выборки, метод максимального правдоподобия, план испытаний.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-60-68

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения испытаний оборудования на надежность разработан целый ряд планов испытаний. Они приведены в стандарте [1].

В статье рассматривается повышение эффективности результатов испытаний по плану $[N, U, \{r, T\}]$, когда отказы электрооборудования имеют распределение Вейбулла; предложена методика повышения точности оценок максимального правдоподобия (МП) по малым, однократно цензурированным выборкам при проведении испытаний по указанному плану.

При использовании плана $[N, U, \{r, T\}]$ одновременно испытывают N объектов. Объекты, которые отказали во время испытаний, не восстанавливаются и не заменяются. Испытания прекращают в случаях:

1. Когда число отказавших объектов достигло r .
2. При истечении времени испытаний.
3. При достижении наработки T каждого неотказавшего объекта [1].

При проведении испытаний по этому плану формируются однократно цензурированные справа выборки. Для снижения стоимости испытаний оборудования на надежность нужно уменьшать количество испытываемых образцов и время проведения испытаний. Но это приводит к формированию малых выборок наработок на отказ.

Для расчета показателей надежности по малым, однократно цензурированным справа выборкам применяется метод максимального правдоподобия [2, 3].

Уменьшение времени испытания оборудования на надежность приводит к снижению достоверности рассчитанных показателей надежности испытываемого электрооборудования. Поэтому оно возможно только при одновременном повышении точности метода максимального правдоподобия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись с помощью моделирования на ЭВМ цензурированных выборок, подобных выборкам, формирующимся при испытаниях оборудования по плану $[N, U, \{r, T\}]$.

Использован следующий алгоритм формирования однократно цензурированной справа выборки:

1. Генерируется случайная величина t , распределенная по исследуемому закону распределения Вейбулла, и рассчитываемая по формуле [4]

$$t = m(-\ln R)^{1/f},$$

где m, f – параметры формы и масштаба закона распределения Вейбулла; R – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $(0,1)$.

2. Полученная случайная величины сравнивается с заданным временем T . Если $t < T$, то к моделируемой выборке добавляется случайная величина t , соответствующая наработке до отказа. Если $t > T$, то к моделируемой выборке добавляется случайная величина T , соответствующая наработке до цензурирования.

3. Процесс моделирования продолжается до тех пор, пока число полученных случайных величин не станет равным заданному числу членов выборки N (объему выборки) или число наработок на отказ не станет равным r .

4. По достижению числа наработок на отказ заданного значения r всем цензурированным наработкам присваивается значение максимальной наработки на отказ.

На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом $N=5, 10, 15, 20, 25$. Генерирование выборок выполнялось при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} 5 \leq N < 10, q &\geq 0,5; \\ 10 \leq N < 20, q &\geq 0,3; \\ 20 \leq N \leq 25, q &\geq 0,2, \end{aligned}$$

где q – степень цензурирования выборки.

Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки параметров формы и масштаба закона распределения Вейбулла и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки:

$$\delta = \frac{p - p_{\text{ОМП}}}{p},$$

где p – истинное значение параметра распределения Вейбулла, которое применялось при моделировании выборки; $p_{\text{ОМП}}$ – оценка максимального правдоподобия параметра распределения Вейбулла.

В исследованиях ставилась задача получения универсальных уравнений, которые можно применять для оборудования с разными значениями средних наработок до отказа. Поэтому параметры m и f исследуемого закона распределения устанавливались для каждой генерируемой выборки с использованием случайного числа, равномерно распределенного на интервале $[0,1]$ по формулам:

$$f = 1,5 + 0,2 \cdot \text{RAND}(), m = 5 + 2 \cdot \text{RAND}(),$$

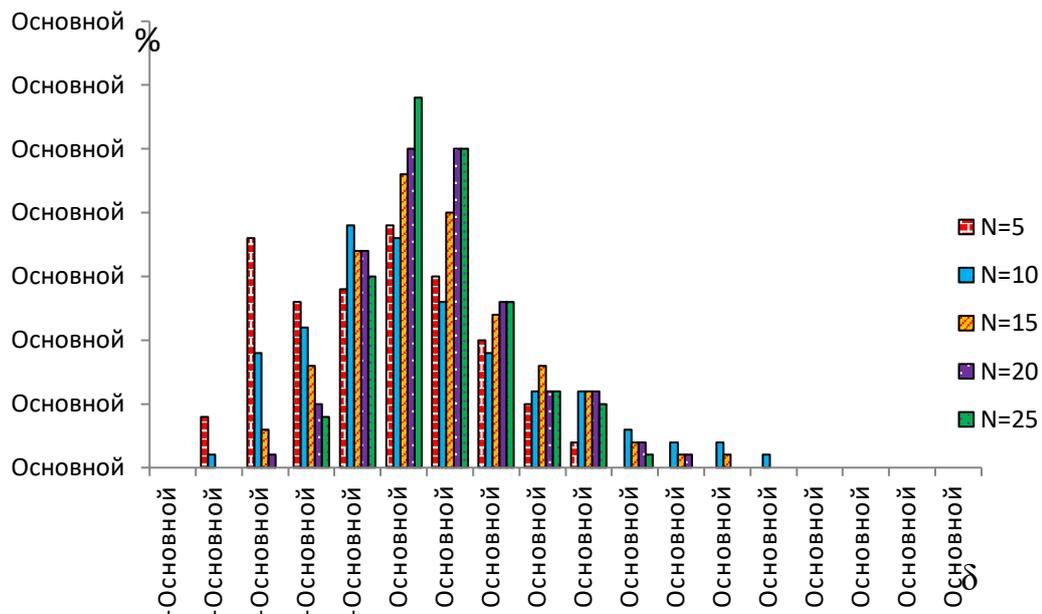
где $\text{RAND}()$ – функция генерации случайного числа, равномерно распределенного на интервале $[0, 1]$, языка программирования Fox Pro.

Продолжительность испытаний также определялась с помощью генератора случайных чисел по выражению

$$T = 0,5 \cdot \text{RAND}() + 1.$$

Число отказов r при моделировании принималось равным 4 при $N = 5$; 7 при $N = 10$; 11 при $N = 15$; 14 при $N = 20$; 18 при $N = 25$.

По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок МП параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла (рис. 1). По оси ординат отложены процент оценок от общего количества, попавших в данный интервал.



б

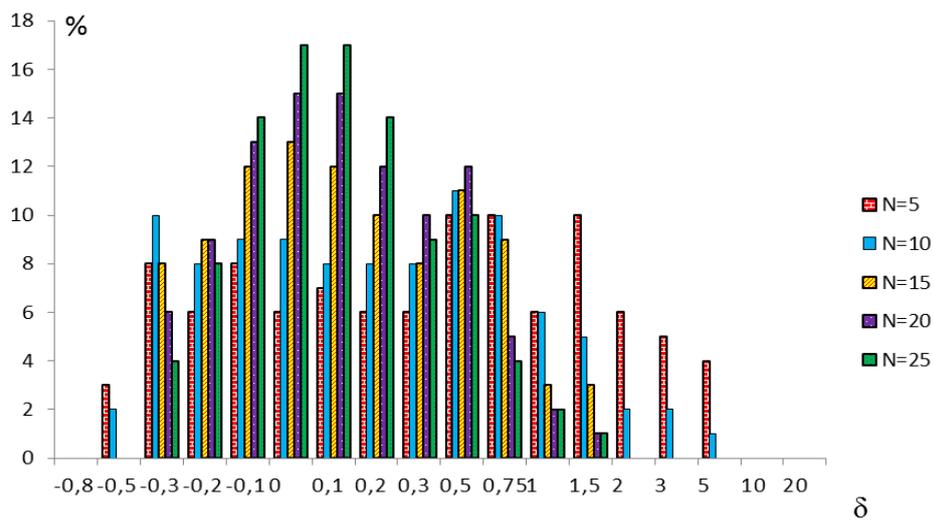


Рис. 1. Относительные отклонения оценки МП параметра:
а – масштаба; б – формы

Можно сделать вывод, что точность метода МП при значениях $N < 25$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 70–100 % и более.

В [5, 6] разработаны математические модели повышения точности оценок МП при проведении испытаний по плану $[N, U, \{r, T\}]$.

Цель проведенных исследований в общем виде можно сформулировать следующим образом: получение математических моделей, устанавливающих связь между относительным отклонением оценок МП параметров распределения Вейбулла от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки.

Этапы решения поставленной задачи:

1. Моделирование на ЭВМ однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по закону распределения Вейбулла, по описанному выше алгоритму.

Чтобы избежать повторения последовательностей псевдослучайных чисел, перед формированием каждой выборки генерировалось случайное число на основе системного времени. Для этого использовалась функция $RAND()$ с отрицательным аргументом –

RAND(-1). Получение достаточной разницы в системном времени при генерации выборок осуществлялось с помощью задержки времени до 30 мс перед каждым циклом формирования однократно цензурированной выборки.

2. Расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались пять стандартных параметров выборки: $X1$ – степень цензурирования; $X2$ – коэффициент вариации; $X3$ – коэффициент вариации полных случайных величин; $X4$ – эмпирический коэффициент асимметрии; $X5$ – коэффициент эксцесса.

Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки: $X6$ – отношение математического ожидания полных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки; $X7$ – отношение математического ожидания цензурированных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки; $X8$ – относительное отклонение математического ожидания от середины вариационного размаха; $X9$ – отношение медианы к математическому ожиданию; $X10$ – отношение моды к математическому ожиданию.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Подробно формулы расчета этих параметров рассмотрены в [5].

3. Расчет оценок МП параметров закона распределения Вейбулла.

4. Расчет зависимого параметра – отклонения оценки МП от истинного значения – по формуле

$$Y = \frac{P}{P_{\text{МП}}}$$

5. Построение регрессионных зависимостей. Были построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объема выборки N построено свое уравнение регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида [7]

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_{10}x_{10}. \quad (1)$$

Уравнения являются значимыми. Коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_{10} и параметры значимости уравнений регрессии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты и параметры значимости уравнений регрессии

b	N									
	m					f				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
b_0	-3,31	-3,08	-2	-1,51	-1,16	5,47	5,02	3,51	3,21	2,97
b_1	1,43	0,64	0,1	0,25	-	0,39	0,41	0,29	0,8	0,66
b_2	-0,22	-0,27	-0,46	-0,39	-0,61	1,31	1,53	1,52	1,66	1,86
b_3	1,22	1,38	1,56	1,27	1,49	-2,69	-2,78	-2,48	-3,05	-3,02
b_4	1,76	1,87	1,11	1,03	0,66	-2,29	-2,32	-0,81	-1,34	-0,034
b_5	-0,37	-0,61	-0,23	-0,17	-0,09	0,67	0,52	0,63	0,49	0,34

b_6	-0,13	-0,08	-0,03	-0,022	0,027	0,2	0,14	0,07	-	-0,027
b_7	-0,05	0,01	-0,005	-0,008	-	0,04	0,04	0,03	0,003	0,024
b_8	0,03	0,10	0,04	-0,012	0,013	-0,28	-0,37	-0,004	-	-0,019
b_9	-0,3	-0,23	0,38	0,077	0,66	1,72	1,05	0,34	-0,38	-0,55
b_{10}	-0,11	0,03	0,02	-0,028	0,002	0,12	0,64	-0,021	0,92	-0,24
Q	424	254	122	82	65	670	495	278	208	158
$Q_{пр}$	183	185	80	50	38	630	466	263	199	150
$Q_{ост}$	242	69	42	32	27	40	29	15	9	9

Примечание. Q – общая сумма квадратов результативного признака; $Q_{пр}$ – общая сумма квадратов, характеризующая влияние признаков; $Q_{ост}$ – остаточная сумма квадратов, т. е. влияние неучтенных факторов.

Полученные уравнения регрессии позволяют рассчитать и ввести поправки к оценке МП по формуле

$$P_{кон} = P_{МП} \cdot \bar{y}(x), \quad (2)$$

где $P_{кон}$ – конечная оценка параметра распределения.

Поправки повышают точность оценки МП.

Была выполнена оценка эффективности полученных регрессионных моделей. Для каждой заново смоделированной выборки по уравнению (1) были получены поправки к оценке МП и рассчитаны конечные оценки параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла по формуле (2).

Результаты применения полученных уравнений регрессии для параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла показаны в табл. 2, 3 и на рис. 2–6 (на рис. 2–6 даны относительные отклонения оценок МП от истинного значения).

Таблица 2

Дисперсия начальных и конечных относительных отклонений оценок параметра масштаба распределения Вейбулла

N	$\delta_{нач}$	$\delta_{кон}$
5	0,047	0,031
10	0,15	0,016
15	0,061	0,011
20	0,047	0,01
25	0,031	0,0089

Таблица 3

Дисперсия начальных и конечных относительных отклонений оценок параметра формы распределения Вейбулла

N	$\delta_{нач}$	$\delta_{кон}$
5	2,11	0,06
10	0,58	0,033
15	0,15	0,006
20	0,094	0,003
25	0,067	0,0027



Рис. 2. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра для $N = 5$:
а – масштаб; б – формы

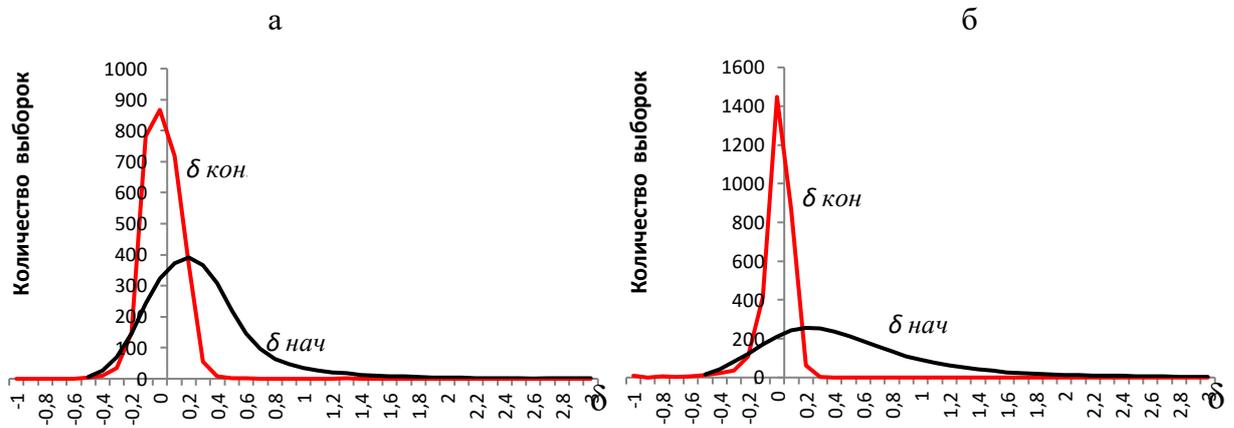


Рис. 3. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра для $N = 10$:
а – масштаб; б – формы

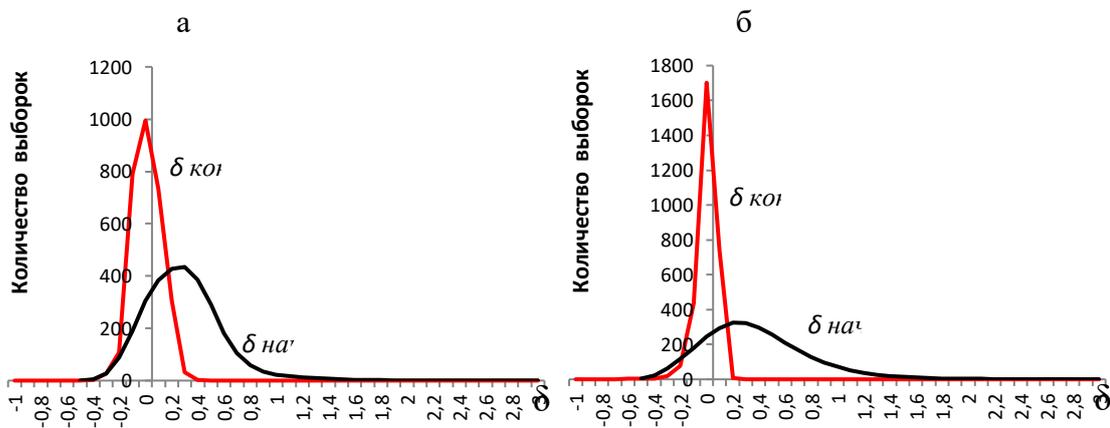


Рис. 4. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 15$ параметра:
а – масштаб; б – формы



Рис. 5. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 20$ параметра:
а – масштаба; б – формы

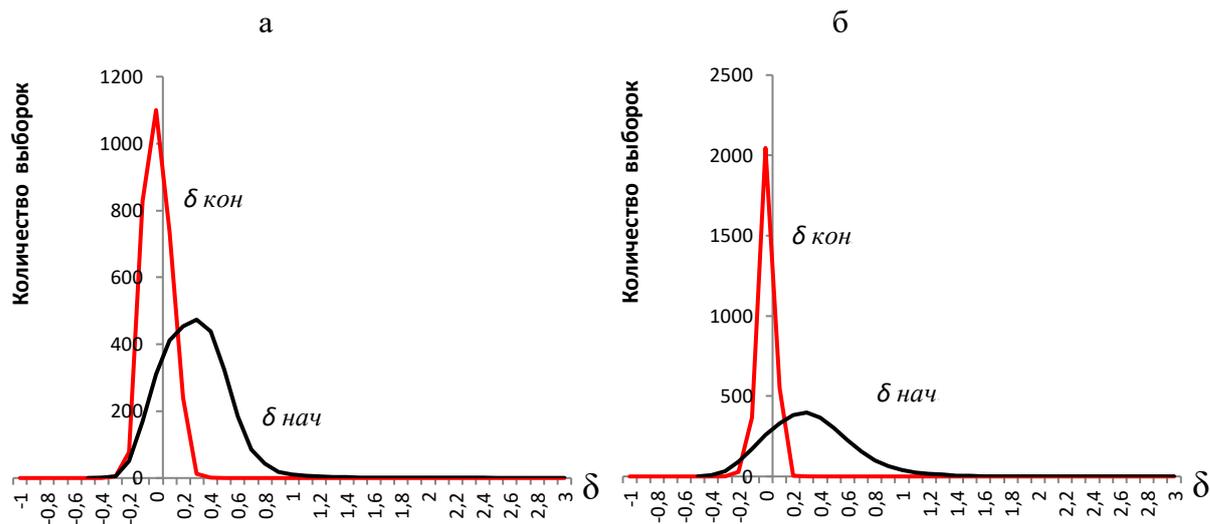


Рис. 6. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 25$ параметра:
а – масштаба; б – формы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Графики, приведенные на рис. 2–6, показывают, что точность оценок МП параметров закона распределения Вейбулла после применения разработанных моделей и введения поправки значительно возрастает. После введения поправки, относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки (не превышают 0,4 для параметра масштаба и 0,3 для параметра формы), в то время как начальные отклонения могут быть больше 2. Это позволит сократить затрачиваемое время при испытании оборудования и сохранить достоверность рассчитанных показателей надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Издательство стандартов, 1987.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Rossi R.J. Mathematical Statistics. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
4. Петрович М.Л., Давидович М.И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1989. 189 с.
5. Русин А.Ю., Абдулхамед М. Управление процессом испытания оборудования на надежность // Надежность. 2014. № 3 (50). С. 27–34.
6. Русин А.Ю., Абдулхамед М. Обработка информации в системе испытаний промышленного оборудования на надежность // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4 (56). С. 27.

7. Scott D. Young. Handbook of Regression Methods. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: alexrusin@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Русин А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 60–68.

TIME REDUCTION TESTS OF RELIABILITY ELECTRICAL EQUIPMENT

A.Y. Rusin

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that improving materials and technologies leads to increased reliability of electrical equipment. It is shown that at the same time, the time for testing new equipment samples for reliability increases and the cost of carrying them out increases. Research results are given that can reduce the time of testing equipment for reliability.

Keywords: computer simulation, reliability testing of electrical equipment, censored samples, maximum likelihood method, test plan.

REFERENCES

1. GOST 27.410-87. Nadezhnost' v tekhnike. Metody kontrolya pokazatelej nadezhnosti i plany kontrol'nyh ispytaniy na nadezhnost' [Industrial product dependability. Inspection methods of reliability indices and plans of check tests on reliability]. M.: Izdatel'stvo standartov. 1987.
2. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics]. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.
3. Richard J. Rossi. Mathematical Statistics. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
4. Petrovich M.L., Davidovich M.I. Statisticheskoe ocenivanie i proverka gipotez na EVM. M.: Finansy i statistika, 1989. 189 p.
5. Rusin A.Y., Abdulhamed M. Equipment reliability test process control. *Nadezhnost'*. 2014. No. 3 (50), pp. 27–34. (In Russian).
6. Rusin A.Y., Abdulhamed M. Information processing in the industrial equipment reliability test system. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2014. No 4 (56), p. 27. (In Russian).
7. Scott D. Young. Handbook of Regression Methods. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

RUSIN Aleksandr Yur'evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alexrusin@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Rusin A.Y. Time reduction tests of reliability electrical equipment // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 60–68.

