

УДК 621.316

UDC 621.316

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

THE FUNDAMENTALS OF CALCULATION OF INDEXES OF PROBABILITY OF NO-FAILURE OF HIGH-VOLTAGE ELEMENTS OF THE ELECTRICAL NETWORK

Мирошников Алексей Владимирович
студент

Miroshnikov Aleksey Vladimirovich
student

Макаренко Алексей Сергеевич
аспирант

Makarenko Aleksei Sergeevich
postgraduate student

Курченко Николай Юрьевич
к.т.н., ассистент
РИНЦ SPIN-код: 8688-8320
kalya1389@gmail.com

Kurchenko Nikolay Yurevich
Cand. Tech. Sci., assistant
RSCI SPIN-code: 8688-8320
kalya1389@gmail.com

Оськин Сергей Владимирович
д.т.н., профессор
РИНЦ SPIN-код: 2746-7547
kgauem@yandex.ru
Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия

Oskin Sergey Vladimirovich
Dr.Sci.Tech., professor
RSCI SPIN-code: 2746-7547
kgauem@yandex.ru
Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia

В статье рассматривается вопрос надежности функционирования оборудования электроснабжающей подстанции, и определения вероятности бесперебойного обеспечения потребителей электроэнергией. Представлены: модели отказов отделителей, модели отказов короткозамыкателей, модели отказов разъединителей. Выделены два статистических ряда для внезапных и постепенных отказов. Показана теория надежности в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах. Сделаны выводы по представленным моделям и даны предложения по внедрению в производство. По представленным моделям можно судить о надежности работы станции, что необходимо для внедрения мероприятий по повышению надежности электроснабжения в сетевых компаниях

The article deals with the reliability of the functioning of the equipment of the power supply substation, and the determination of the probability of uninterrupted supply of electricity to consumers. The following are presented: models of failures of separators, models of short-circuit failures, models of failures of disconnectors. Two statistical series for sudden and gradual failures are singled out. The reliability theory is shown as the main distribution of fail-safe time for sudden failures. The conclusions on the presented models are made and the suggestions on introduction into production are given. According to the presented models, it is possible to judge the reliability of the station's operation, which is necessary for implementing measures to improve the reliability of electricity supply in network companies

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ОТДЕЛИТЕЛЬ, КРОТКОЗАМЫКАТЕЛЬ, РАЗЪЕДИНИТЕЛЬ

Keywords: RELIABILITY OF AN ELECTRICAL NETWORK, SEPARATOR, SHORT CIRCUITOR, DISCONNECTOR.

Doi: 10.21515/1990-4665-128-046

Проблема обоснования целесообразного уровня надежности систем электроснабжения на современном этапе развития имеет большое значение. Аварийные и внезапные перерывы электроснабжения потребителей

вызывают большой народнохозяйственный ущерб, обусловленный поломкой оборудования, порчей сырья и материалов, затратами на ремонты, недовыпуском продукции, простоями технологического оборудования и рабочей силы, а также издержками связанными с другими факторами.

Сегодня методы анализа надежности используются уже во многих отраслях техники. Однако проблема надежности в ее количественной постановке при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения необыкновенно сложна. Так для рассмотрения вопросов надежности, при эксплуатации систем электроснабжения необходимо учесть как современные достижения современной теории надежности, так и специфику функционирования систем силового типа, подверженных в значительной степени влиянию неблагоприятных воздействий внешней среды и непосредственно связанных с электрической системой.

Целью данной статьи является рассмотрение надежности функционирования оборудования электроснабжающей подстанции, и определение вероятности бесперебойного обеспечения потребителей электроэнергией. На рисунке 1 показана структурная схема основного оборудования трансформаторной подстанции (ТП) для расчета показателей надежности и приведена общая формула определения вероятности безотказной работы.



Рисунок 1 – Структурная схема для расчета вероятности безотказной работы основного оборудования трансформаторной подстанции

Общая формула для расчета вероятностей безотказной работы данной системы:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{отд}} \cdot P_{\text{крз}} \cdot P_{\text{раз}} \quad (1)$$

где $P_{\text{отд}}$ - вероятность безотказной работы отделителей, $P_{\text{крз}}$ - вероятность безотказной работы короткозамыкателей, $P_{\text{раз}}$ - вероятность безотказной работы разъединителей.

Согласно общей теории надежности технических систем отказы бывают внезапные и постепенные (параметрические), связанные с износом, старением элементов систем. Известно, что сегодня в эксплуатации находятся до 80% трансформаторных подстанций за амортизационным сроком работы. В таком случае на общую надежность все больше начинают влиять параметрические отказы. Рассмотрим отделитель как элемент, условно состоящий из двух последовательно соединенных элементов, в одном из которых могут появляться внезапные отказы, а в другом - постепенные. Внезапные отказы появляются вследствие резкого, внезапного изменения основных параметров под воздействием одного или нескольких случайных факторов внешней среды либо вследствие ошибок обслуживающего персонала. При постепенных отказах наблюдается плавное, постепенное изменение параметра элементов в результате износа отдельных частей или всего элемента в целом.

Вероятность безотказной работы представим произведением вероятностей:

$$P_{\text{отд}}(t) = P_{\text{в}}(t) \cdot P_{\text{п}}(t), \quad (2)$$

где $P_{\text{в}}(t)$ и $P_{\text{п}}(t)$ — соответственно вероятности безотказной работы условных элементов, соответствующих внезапному и постепенному отказу в следствии износа.

В теории надежности для электрооборудования в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах принимается показательное распределение:

$$P(t > T) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

где λ – параметр показательного закона, t -время вероятности безотказной работы.

Постепенные отказы отделителей происходят в основном по причине износа изоляции. Износ можно описать законом распределения Вейбулла-Гнеденко:

$$P(t>T) = e^{-c(t-t_0)} \tag{4}$$

где C -параметр масштаба распределения Вейбулла - Гнеденко t_0 -порог чувствительности, то есть элемент гарантировано не откажет, в интервале времени от 0 до t_0 может быть равно нулю. Тогда окончательно имеем:

$$P_{отд}(t) = e^{-\lambda t} \cdot e^{-ct} \tag{5}$$

Причинами внезапных отказов отделителей являются повреждения вводов отделителей вследствие перекрытия контактных соединений. Причинами постепенных отказов в свою очередь будут нарушения изоляции вследствие возникновения внешних и внутренних перенапряжений, сквозных токов коротких замыканий и дефектов изготовления. На основании принятых критериев выделим два статистических ряда для внезапных и постепенных отказов таблице 1 [6].

Таблица 1-Статистический ряд внезапных и постепенных отказов отделителей.

Y,ч	Y,ч	Y,ч	Y,ч	X,ч	X,ч	X,ч	X,ч
40273	44591	40519	43075	31377	35695	31623	34179
42111	45483	44578	44448	33215	36587	35682	35522
41549	43026	43454	43575	32653	34130	34558	34679
40273			45483				
Y_{ср}		Δt		T		λ	
43056,83		968,5489		49188000		2,03302E-07	

Параметр показательного закона λ находим по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{x_{cp}} \quad \lambda = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_1^n x_i} \tag{6}$$

где x_{cp} — среднее значение наработок на отказ.

Среднее время безотказной работы определим по формуле:

$$\overline{T_{лом}} = \frac{1}{\lambda_{лом}} \quad (7)$$

Оценим параметры распределения Вейбулла-Гнеденко. Для этого вычислим среднее значение наработки на отказ:

$$y_{cp} = \frac{1}{m} \sum_1^m y_i \quad (8)$$

Разобьем выборку y на интервалы, которые выберем по формуле:

$$\Delta t = \frac{y_{max} - y_{min}}{1 + 3,3 \lg m} = 968,5489 \quad (9)$$

Подсчитаем сколько отказов попало в каждый из полученных интервалов и сведем все подсчеты в таблицу 2 [6].

Таблица 2- Количество отказов отделителей в каждый из полученных интервалов.

Интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	40273	42111	43575	31377	33215	34679
макс	42111	43575	45483	33215	71350	36587
1	40273	43026	44448	31377	34130	35522
2	40519	43075	44578	31623	34179	35682
3	41549	43454	44591	32653	34558	35695
4	42111	43575	45483	33215	34679	36587
Y_{cp}	41113	43282,5	44775	32217	34386,5	35871,5
p_i	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,33333333
D			1/a	C	T	
1049737	1024,567	0,002644	0,31	4,52E-16	307425	3,25283E-06

Относительную частоту событий определяем по формуле:

$$p_i = m_i / m. \quad (10)$$

Определим среднее значение для каждого интервала по формуле (8).

Вычислим значение дисперсии D по формуле:

$$D = \sum_{i=1}^R (\bar{y}_i - \bar{y}_{cp})^2 \cdot p_i \quad (11)$$

Определим среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (12)$$

Вычислим коэффициент вариации по формуле:

$$\bar{v} = \frac{\sigma}{\bar{y}_{cp}} \quad (13)$$

По номограмме находим значение параметра формы $1/\alpha=0,31$. По найденным значениям вычислим параметр масштаба распределения Вейбулла-Гнеденко:

$$c = \left(\frac{\bar{y}_{cp}}{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})} \right)^{-\alpha} \quad (14)$$

$$\Gamma(1,0351)=0,987$$

Среднее время безотказной работы для распределения Вейбулла-Гнеденко определим по формуле:

$$\bar{T}_{2omd} = \frac{\Gamma(1 + 1/\alpha)}{c^{1/\alpha}}; \quad (15)$$

По формуле (5) рассчитаем вероятность безотказной работы для промежутка времени в 1000 и 10000 часов:

$$P_{отд(1000)} = e^{3,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} e^{4,52 \cdot 10^{-16} \cdot 1000} = 0,996$$

$$P_{отд(10000)} = e^{3,25 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} e^{4,52 \cdot 10^{-16} \cdot 10000} = 0,967$$

Рассмотрим короткозамыкатель как устройство, состоящее из двух элементов, в одном из которых может появиться внезапный отказ, а в другом постепенный. Вероятность безотказной работы короткозамыкателя представлена формулой (2).

Постепенные отказы короткозамыкателя происходят в следствии износа контактов, несвоевременной чистке изоляции. В теории надежности в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах принимается показательное распределение формула (5).

Причинами внезапного отказа являются: механические повреждения короткозамыкателя, попадание влаги на контакты, неподготовленность персонала. На основании принятых критериев сформируем два статистических ряда представленных в таблице 3.

Таблица 3- Статистический ряд внезапных и постепенных отказов короткозамыкателя.

Y,ч	Y,ч	Y,ч	Y,ч	X,ч	X,ч	X,ч	X,ч
41326	45789	41581	44222	32430	36893	32685	35326
43154	45854	44382	46485	34258	36958	35486	37589
42645	44171	44614	44738	33749	35275	35718	35845
41326			46485				
Y_{ср}		Δt		T		λ	
44080,08		959,0679		5066544		1,97373E-07	

Параметр показательного закона λ находим по формуле (6), среднее время безотказной работы определим по формуле (7). Оценим параметры распределения Вейбулла-Гнеденко. Для этого вычислим среднее значение наработки на отказ (8). Разобьем выборку y на интервалы, которые выберем по формуле (9). Подсчитаем сколько отказов попало в каждый из полученных интервалов и сведем все подсчеты в таблицу 4.

Таблица 4- Количество отказов короткозамыкателя в каждый из полученных интервалов.

Интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	41326	43154	44614	32430	34258	35718
макс	43154	44614	46485	34258	35718	37589
1	41326	44171	44738	32430	35275	35842
2	41581	44222	45789	32685	35326	36893
3	42645	44382	45854	33749	35486	36958
4	43154	44614	46485	34258	35718	37589
5						
Ycp	42176,5	44347,25	45716,5	33280,5	35451,25	36820,5
pi	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,33333333
D			1/a	C	T	
1314767	1146,633	0,00289	0,31	4,19E-16	316656,8	3,15799E-06

Относительную частоту событий определяем по формуле (10), определим среднее значение для каждого интервала (8), вычислим значение дисперсии D по формуле (11), определим среднеквадратичное отклонение (12), вычислим коэффициент вариации по формуле (13). По номограмме находим значение параметра формы $1/\alpha=0,34$. По найденным значениям вычислим параметр масштаба распределения Вейбулла-Гнеденко (14).

$$\Gamma(1,0351)=0,9$$

Среднее время безотказной работы для распределения Вейбулла-Гнеденко определим по формулам (15), (7).

Вероятность безотказной работы короткозамыкателя для времени 1000 и 10000 часов определяем по формуле (5):

$$P_{крз(1000)} = e^{-3,16 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} e^{-4,19 \cdot 10^{-16} \cdot 1000} = 0,996$$

$$P_{крз(10000)} = e^{-3,16 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} e^{-4,19 \cdot 10^{-16} \cdot 10000} = 0,968$$

Разъединитель рассмотрим как элемент условно состоящий из двух последовательно соединенных элементов, в одном из которых может появиться внезапный отказ, а в другом постепенный. Вероятность безотказ-

ной работы представим как произведение вероятности двух независимых событий соединенных последовательно относительно надежности (2). Дальнейший расчет проведем как и для отделителей и короткозамыкателей. Статистические данные приведенные в таблице 5.

Таблица 5-Статистический ряд внезапных и постепенных отказов для разъединителей.

У,ч	У,ч	У,ч	У,ч	Х,ч	Х,ч	Х,ч	Х,ч
78451	78250	75756	80246	69555	69354	66860	71350
77536	80146	80916	81116	68640	71250	72020	72220
У_{ср}		Δt		T		λ	
79052		1128		70156		0,000014	

В теории надежности в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах разъединителей принимается показательное распределение (3). Постепенные отказы разъединителей происходят в основном по причине износа проходных изоляторов. Износ можно описать законом распределения Вейбулла-Гнеденко (5). Параметр показательного закона λ находим по формуле (6), среднее время безотказной работы определим по формуле (7). Оценим параметры распределения Вейбулла-Гнеденко. Для этого вычислим среднее значение наработки на отказ (8). Разобьем выборку y на интервалы, которые выберем по формуле (9):

$$\Delta t = 1050$$

Подсчитаем сколько отказов попало в каждый из полученных интервалов и сведем их таблицу 6.

Таблица 6- Количество отказов разъединителей в каждом из полученных интервалов.

Интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	66860	69354	71350	66860	69354	71350
макс	69354	71350	72220	69354	71350	72220
1	66860	69555	72020	66860	69555	72020
2	68640	71250	72220	68640	71250	72220
3	69354	71350		69354	71350	
$Y_{\text{ср}}$	68284	70718,33	72120	68284,66667	70718,33	72120
P_i	0,375	0,375	0,25	0,375	0,375	0,25
D			1/a	C	T	
5607640	2368,045608	0,003739	0,31	9,25887E-17	633369	1,57886E-06

Относительная частота событий определяется по формуле (10) определим среднее значение для каждого интервала (8), вычислим значение дисперсии D по формуле (11), определим среднеквадратичное отклонение (12), вычислим коэффициент вариации по формуле (13).

По номограмме находим значение параметра формы $1/\alpha=0,36$. По найденным значениям вычислим параметр масштаба C распределения Вейбулла – Гнеденко (14):

$$\Gamma(1,36) = 0,8902$$

Среднее время безотказной работы для распределения Вейбулла-Гнеденко определим по формулам (15), (7). Вероятность безотказной работы разъединителей для времени 1000 и 10000 часов определяем по формуле (5):

$$P_{\text{раз (1000)}} = e^{1,57 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} e^{9,26 \cdot 10^{-17} \cdot 1000} = 0,998$$

$$P_{\text{раз (10000)}} = e^{1,57 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} e^{9,26 \cdot 10^{-17} \cdot 10000} = 0,984$$

Из полученных данных легко вычислить общее значение вероятности безотказной работы перечисленных элементов электрической сети (1):

$$P_{\text{общ (1000)}} = 0,996 \cdot 0,996 \cdot 0,998 = 0,99$$

$$P_{\text{общ (10000)}} = 0,967 \cdot 0,968 \cdot 0,984 = 0,921$$

Таким образом, по представленным моделям с высокой степенью достоверности можно судить о надежности работы ТП, что необходимо для внедрения мероприятий по повышению надежности электроснабжения в сетевых компаниях. Вероятность безотказной работы данной системы имеет низкое значение, так как в общей структуре электроснабжения имеются еще элементы - трансформатор, линии электропередач и т.д. Для сельского хозяйства необходима высокая надежность электроснабжения, потому что потребителями являются биологические объекты, сельхозпродукция в частности молочная которые не терпят перерывов в электроснабжении, тепличные комплексы, инкубаторы и многое другое. Электромеханизация производственных процессов в сельском хозяйстве сделала электроэнергию основной энергетической базой в стационарных процессах сельскохозяйственного производства. Это обстоятельство, в свою очередь, повышает требования к качеству сельского электроснабжения: его надежности, качеству электроэнергии и экономичности передачи электроэнергии в сельскохозяйственных сетях.

Литература

1. Оськин С.В. Повышение надежности электроприводов в сельском хозяйстве (Текст)/ С.В. Оськин, И.А. Переверзев, А.Ф. Кроневальд// Механизация и электрификация сельского хозяйства.-2008.- №1.-с. 20-21.
2. Оськин С.В. Определение надежности электроприводов по статистическим данным об отказах (Текст)/С.В. Оськин, А.Ф. Кроневальд, А.И.Вандке, А.С. Оськин// Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008.-№7.-с.26-27.
3. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. - М.: Энергоатомиздат, 1981.-224с.
4. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200с.
5. Р. Хэвиленд., Инженерная надежность и расчет на долговечность. М.: Энергия, 1966. – 232с.
6. Арынов А.К, Кошельков Р.У. Оценка эксплуатационной надежности элементов энергосистем /Арынов А.К, Кошельков Р.У./ Режим доступа: [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].
7. Макаренко А.С. Основы расчета показателей надежности элементов электрических сетей / А.С. Макаренко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал

КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №98(04). IDA [article ID]: 0981404037. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/04/37/>

8. Оськин С.В, Макаренко А.С. Основы расчета вероятности безотказной работы силового трансформатора /С.В. Оськин, А.С. Макаренко/ Труды КубГАУ (Научный журнал КубГАУ) - Краснодар: КубГАУ, 2014. - №47.

References

1. Os'kin S.V. Povyshenie nadezhnosti jelektoprivodov v sel'skom hozjajstve (Tekst)/ S.V. Os'kin, I.A. Pereverzev, A.F. Kroneval'd// Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva.-2008.- №1.-s. 20-21.

2. Os'kin S.V. Opredelenie nadezhnosti jelektoprivodov po statisticheskim dannym ob otkazah (Tekst)/S.V. Os'kin, A.F. Kroneval'd, A.I.Vandke, A.S. Os'kin// Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. 2008.-№7.-s.26-27.

3. Fokin Ju.A., Tufanov V.A. Ocenka nadezhnosti sistem jelektronsnabzhenija. - M.: Jenergoatomizdat, 1981.-224s.

4. Rozanov M.N. Nadezhnost' jelektrounergeticheskikh sistem. – M.: Jenergoatomizdat, 1984. – 200s.

5. R. Hjevilend., Inzhenernaja nadezhnost' i raschet na dolgovechnost'. M.: Jener-gija, 1966. – 232s.

6. Arynov A.K, Koshel'kov R.U. Ocenka jekspluatacionnoj nadezhnosti jelementov jenergosistem /Arynov A.K, Koshel'kov R.U./ Rezhim dostupa: [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

7. Makarenko A.S. Osnovy rascheta pokazatelej nadezhnosti jelementov jelektricheskikh setej / A.S. Makarenko // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Краснодар: KubGAU, 2014. – №98(04). IDA [article ID]: 0981404037. Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/04/37/>

8. Os'kin S.V, Makarenko A.S. Osnovy rascheta verojatnosti bezotkaznoj raboty silovogo transformatora /S.V. Os'kin, A.S. Makarenko/ Trudy KubGAU (Nauchnyj zhurnal KubGAU) - Krasnodar: KubGAU, 2014. - №47.