

УДК 621.316

UDC 621.316

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ**

**BASES OF CALCULATION OF INDICATORS
OF RELIABILITY OF ELEMENTS**

Макаренко Алексей Сергеевич
аспирант кафедры ЭМ и ЭП
*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Makarenko Aleksei Sergeevich
postgraduate student
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье представлены модели отказов и восста-
новления силового трансформатора, модели отка-
зов и восстановления автоматического выключате-
ля, модели отказов и восстановления воздушной
линии электропередач, сделаны выводы по пред-
ставленным моделям и даны предложения по внед-
рению в производство

In the article we have presented the models of refusals
and restoration of the power transformer, the model of
refusals and restoration of the automatic switch, the
model of refusals and restoration of an air-line of elec-
tricity transmissions; we have also made conclusions
for the presented models and offers for introduction in
manufacture

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕ-
СКОЙ СЕТИ СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР,
ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, АВТОМАТИЧЕ-
СКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Keywords: RELIABILITY OF ELECTRIC NET-
WORK, POWER TRANSFORMER, ELECTRIC
MAIN, AUTOMATIC SWITCH, OIL SWITCH

Проблема обоснования целесообразного уровня надежности си-
стем электроснабжения на современном этапе развития имеет большое
значение. Аварийные и внезапные перерывы электроснабжения потреби-
телей вызывают большой народнохозяйственный ущерб, обусловленный
поломкой оборудования, порчей сырья и материалов, затратами на ремон-
ты, 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 по-
становке при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения
необыкновенно сложна. Так для рассмотрения вопросов надежности, при
эксплуатации систем электроснабжения необходимо учесть как современ-
ные достижения современной теории надежности, так и специфику функ-
ционирования систем силового типа, подверженных в значительной сте-
пени влиянию неблагоприятных воздействий внешней среды и непосред-
ственно связанных с электрической системой.

Целью данной статьи является попытка рассмотрения надежности функционирования оборудования подстанции, и связанная с этим надежность бесперебойного обеспечения потребителей электроэнергией. На рисунке 1 показана структурная схема оборудования и приведена общая формула вероятности безотказной работы.

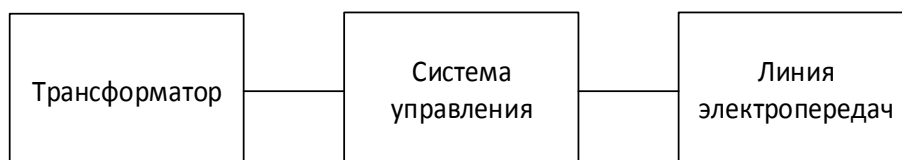


Рисунок 1 – Структурная схема расчета надежности электрической сети

Общая формула для расчета вероятностей безотказной работы

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{тр}} \cdot P_{\text{су}} \cdot P_{\text{лэп}} \quad (1)$$

где $P_{\text{тр}}$ - вероятность отказа трансформатора, $P_{\text{су}}$ - вероятность отказа системы управления, $P_{\text{лэп}}$ - вероятность отказа ЛЭП.

Рассмотрим трансформатор 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:

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

где $P_B(t)$ и $P_R(t)$ — 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 трансформатора происходят в основном по причине износа изоляции и не подготовленностью персонала. Износ можно описать законом распределения Вейбулла-Гнеденко:

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

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:

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

Причинами внезапных отказов трансформатора являются повреждения вводов трансформатора вследствие перекрытия контактных соединений, утечка масла [оценка эксплуатационной надежности элементов энергосистем А.К. Арынов, Р.У. Кошельков УДК 621.311.1]. Причинами постепенных отказов в свою очередь будут нарушения изоляции обмоток 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. [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

Таблица 1-Статистический ряд внезапных и постепенных отказов силового трансформатора.

Y, ч	Y, ч	Y, ч	X, ч	X, ч	X, ч
61039	57546	53529	43774	45022	45850
59612	55392	51355	41283	42078	42906
54349	60483	56438	44608	45436	46264
39215	40041	40869	38681	32541	49967
60761	56854	52914	64123	57560	53785
58783	55739	50785	36581	37141	37967
Y_{ср}		Δt	T		λ
53650		4234	44754		2,23·10 ⁻⁵

Параметр показательного закона λ находим по формуле:

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

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

Среднее время безотказной работы определим по формуле:

$$\overline{T}_{1гр} = \frac{1}{\lambda_{1гр}} \tag{7}$$

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

$$y_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \tag{8}$$

Разобьем выборку y на интервалы, которые выберем по формуле:

$$\Delta t = \frac{y_{max} - y_{min}}{1 + 3,3 \lg m} = 4234 \tag{9}$$

Подсчитаем сколько отказов попало в каждый из полученных интервалов и сведем все подсчеты в таблицу 2 [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

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

интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	39215	43448	47682	51915	56149	60383
макс	43448	47682	51915	56149	60383	64616
1	39215		50785	52914	56854	60483
2	40041		51355	53529	59612	61039
3	40869			54349	56438	60761
4				55392	58783	
5				55739	57546	
$Y_{\text{ср}}$	40041		51070	54384	57846	60761
P_i	0,166	0	0,111	0,277	0,277	0,166
D	s	n	1/a	C	T	l
45761731	6765	0,128	0,31	$5,94 \cdot 10^{-16}$	51796	0,000019

Относительную частоту событий определяем по формуле:

$$p_i = m_i / m. \tag{10}$$

Определим среднее значение для каждого интервала по формуле (8)

Вычислим значение дисперсии D по формуле:

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

Определим среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D} \tag{12}$$

Вычислим коэффициент вариации по формуле:

$$\bar{v} = \frac{\sigma}{\bar{y}_{\text{ср}}} \tag{13}$$

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

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

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

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

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

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

$$P_{тр(1000)} = e^{2,23 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} e^{5,94 \cdot 10^{-16} \cdot 1000} = 0,978$$

$$P_{тр(10000)} = e^{2,23 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} e^{5,94 \cdot 10^{-16} \cdot 10000} = 0,8$$

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

Постепенные отказы выключателя происходят в следствии износа контактов, попадания пыли на контакты (оценка эксплуатационной надежности элементов энергосистем А.К. Арынов, Р.У. Кошельков УДК 621.311.1). В теории надежности в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах принимается показательное распределение формула (5).

Причинами внезапного отказа являются: механические повреждения автоматического выключателя, попадание влаги на контакты. На основа-

нии принятых критериев сформируем два статистических ряда представленных в таблице 3 [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

Таблица 3- Статистический ряд внезапных и постепенных отказов автоматического выключателя.

Y, ч	Y, ч	Y, ч	X, ч	X, ч	X, ч
26883	34704	22704	23528	25671	25662
30156	42024	34302	26247	31236	32145
19074	20079	23256	31986	34950	43050
28368	29202	51132	46620	61137	46353
52368	49452	41781	28356	34530	40440
48465	52605	50208	21225	23049	20874
Y _{ср}		Δt	T		λ
36489		6504	33168		0,00003

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 [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

Таблица 4- Количество отказов автоматического выключателя в каждый из полученных интервалов.

интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	19074	20079	22557	25035	27513	29991
макс	20079	22557	25035	27513	29991	32469
1	19074	25035	27513	29991	32469	34947
2	21552	27513	29991	32469	34947	37425
3	24030			34947	37425	39903
4					39903	

5					42381	
Y_{иср}	21552	26274	28752	32469	37425	37425
P_i	0,167	0,11	0,11	0,167	0,278	0,167
D	σ	v	1/α	C	T	I
75680121	8699	0,238	0,34	1,18·10 ⁻¹⁴	33333	0,0000301

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 автоматического выключателя для времени 1000 и 10000 часов определяем по формуле (5):

$$P_{ав(1000)} = e^{-0,00003 \cdot 1000} e^{-1,18 \cdot 10^{-14} \cdot 1000} = 0,97$$

$$P_{ав(10000)} = e^{-0,00003 \cdot 10000} e^{-1,18 \cdot 10^{-14} \cdot 10000} = 0,74$$

ЛЭП рассмотрим как элемент условно состоящий из двух последовательно соединенных элементов, в одном из которых может появиться внезапный отказ, а в другом постепенный. Вероятность безотказной работы представим как произведение вероятности двух независимых событий соединенных последовательно относительно надежности (2). Дальнейший расчет проведем как и для трансформатора. Статистические данные при-

веденные в таблице 5 [<http://www.twirpx.com/file/523118/>], приведены к единичной длине 1 км, как для внезапных и постепенных отказов.

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

Y, ч	Y, ч	Y, ч	X, ч	X, ч	X, ч
30912	32604	34386	17411	20304	17913
31675	33417	35159	18083	41213	18767
34587	33258	31648	17555	36988	35487
33225	34968	32137	20133	17741	21158
31054	32758	34578	18425	20475	19792
31829	33609	36325	19108	20988	21567
Y_{ср}		Dt	T		λ
33229		1050	22395		0,000045

В теории надежности в качестве основного распределения времени безотказной работы при внезапных отказах ЛЭП принимается показательное распределение (3).

Постепенные отказы ЛЭП происходят в основном по причине износа 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 [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

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

интервалы	1	2	3	4	5	6
мин	30912	31962	33012	34062	35112	36162
макс	31962	33012	34062	35112	36162	37212
1	30912	32604	33225	34587	35159	36325
2	31675	32137	33417	34968		
3	31054	32758	33258	34578		
4	31829		33609	34386		
5	31648					
$Y_{\text{ср}}$	31423	32499	33377	34629	35159	36325
P_i	0,277	0,166	0,222	0,222	0,055	0,055
D	s	n	$1/a$	C	T	I
2627333	1620	0,048	0,36	$2,72 \cdot 10^{-13}$	32925	0,00003

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 линии электропередач для времени 1000 и 10000 часов определяем по формуле (5):

$$P_{\text{лэп}}(1000) = e^{0,000045 \cdot 1000} e^{2,72 \cdot 10^{-13} \cdot 1000} = 0,95$$

$$P_{\text{лэп}}(10000) = e^{0,000045 \cdot 10000} e^{2,72 \cdot 10^{-13} \cdot 10000} = 0,64$$

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

$$P_{\text{общ}(1000)}=0,978 \cdot 0,97 \cdot 0,95=0,9$$

$$P_{\text{общ}(10000)} = 0,8 \cdot 0,74 \cdot 0,64= 0,4$$

Таким образом, по представленным моделям с высокой степенью достоверности можно судить об устойчивости работы электрической сети, что необходимо для внедрения и использования в сетевых компаниях.

Вероятность безотказной работы имеет хорошее значение для 1000 часов и наблюдается падение для 10000 часов, но каждый год элементы электрической сети обслуживаются и вероятность отказа снижается, т.е. можно однозначно сказать, что вероятность безотказной работы очень высока, но и сбрасывать со счетов вероятность отказов тоже нельзя, потому как каждый отказ в сельском хозяйстве может иметь не обратимый характер. 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.

Список использованных источников

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. Оценка эксплуатационной надежности элементов энергосистем а.к. арынов, р.у. кошелько
7. [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].

References

1. Os'kin s.v. povyshenie nadezhnosti jelektroprivodov 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 jelektroprivodov 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 jelektrosnabzhenija. - м.: jenergoatomizdat, 1981.-224s.
4. Rozanov m.n. nadezhnost' jelektrojenergeticheskikh sistem. – м.: jenergoatomizdat, 1984. – 200s.
5. R. Hjevilend., inzhenernaja nadezhnost' i raschet na dolgovechnost'. М.: jenergija, 1966. – 232s.
6. Ocenka jekspluatacionnoj nadezhnosti jelementov jenergosistem a.k. arynov, r.u. koshel'ko
7. [<http://www.twirpx.com/file/523118/>].