

**С.Ю. Бутузов, Е.Н. Минеев, М.Ю. Прус**  
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: free-abcent9001@mail.ru)

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ**

*Предлагается эмпирически обоснованная математическая зависимость для оценки наработки и износа электрических аппаратов защиты электросети в зависимости от их поломок.*

*Ключевые слова: электрические аппараты защиты, наработка на отказ, надёжность.*

**S.Yu. Butuzov, E.N. Mineev, M.Yu. Prus**

## **TECHNIQUE OF THE ASSESSMENT OF INDICATORS OF RELIABILITY ELECTRIC DEVICES OF PROTECTION OF THE POWER SUPPLY NETWORK**

*Empirically reasonable mathematical dependence for an assessment of an operating time and wear of electric devices of protection of the power supply network depending on their break-ages is offered.*

*Key words: electric devices of protection, time between failures, reliability.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 14 марта 2016 г.

В процессе эксплуатации *электрических аппаратов защиты (ЭАЗ)* вследствие термических, механических воздействий, электромагнитных полей, агрессивной окружающей среды, снижения качества электроэнергии накапливаются необратимые изменения, снижающие прочность, нарушающие координацию и взаимодействие частей ЭАЗ. Эти изменения в случайные моменты времени могут приводить к отказу элемента [1] и, как следствие, не позволяют ЭАЗ обеспечить пожарную безопасность электрооборудования. Поэтому одним из важных критериев эксплуатации ЭАЗ является готовность к отключению электросети объекта в случае возникновения предаварийной ситуации.

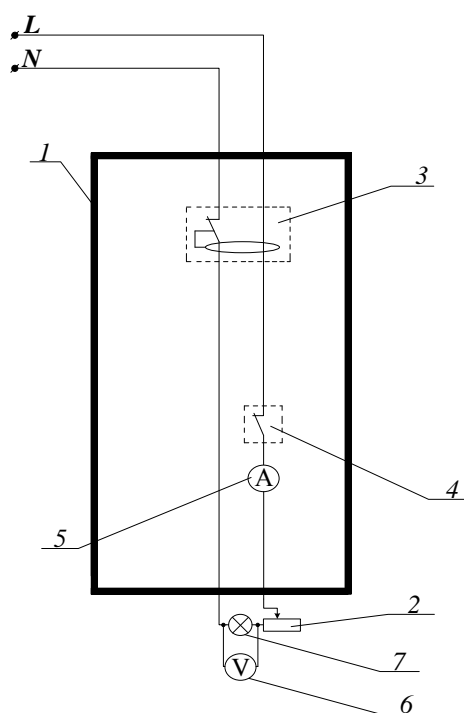
Для ЭАЗ электросети установлены такие нормативные показатели надёжности [2, 3]: вероятность безотказной работы, наработка на отказ (среднее число отказов) и т. д. Определение характеристик надёжности ЭАЗ осуществляется с использованием информации об отказах и неисправностях, возникающих в процессе их эксплуатации. При количественном анализе информации о надёжности определяется фактический уровень надёжности ЭАЗ, оценка которого проводится с использованием показателей, получаемых по известным математическим зависимостям.

При оценке надёжности технических изделий широко используется понятие "наработка", под которой понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах, переключениях или других единицах в зависимости от вида и функционального назначения изделия.

Наработка на отказ ЭАЗ зависит как от внешних, так и внутренних факторов. Природа возникновения первых не зависит от свойств ЭАЗ, вторых – обусловлена их свойствами [3]. В качестве основного показателя надёжности функционирования ЭАЗ можно использовать "наработку на отказ", который позволяет охарактеризовать безотказность и долговечность электрооборудования.

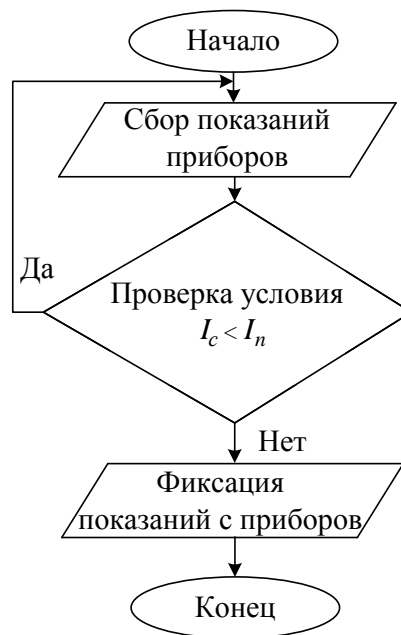
Существует несколько методов прогнозирования надёжности ЭАЗ. Одним из таких методов является прогнозирование срока их службы методом ускоренных испытаний. Данный метод основан на определении зависимостей срока службы ЭАЗ от силы электрического тока [4].

Авторами разработана методика определения наработки на отказ ЭАЗ [1], по которой были проведены *экспериментальные исследования (ЭИ)*, позволяющие определить влияние изменений силы тока электрической сети на надёжность работы ЭАЗ (рис. 1). В качестве испытуемых образцов использовались устройства защитного отключения и автоматические выключатели.



1 – электрощит; 2 – реостат; 3 – устройство защитного отключения; 4 – автоматический выключатель; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – сопротивление (электрическая лампа);  
 $L$  – фаза;  $N$  – ноль

а) Принципиальная схема испытательной установки электрических аппаратов защиты



$I_c$  – значение силы тока в электрической сети;  
 $I_n$  – пороговое значение силы тока, при котором должен сработать электрический аппарат защиты

б) Блок-схема алгоритма испытания электрического аппарата защиты на экспериментальной установке

**Рис. 1.** Принципиальная схема и блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований

Предложена принципиальная схема и алгоритм проведения ЭИ с целью определения границ безотказной работы ЭАЗ, а также влияния параметров электросети (сопротивления сети и силы тока) на характер их работы.

Получена зависимость наработки на отказ ЭАЗ от силы тока в электросети путём форсированных испытаний. Испытания ЭАЗ на отказы проводились путём создания аварийной ситуации. Идентификация состояния ЭАЗ проводилась путём определения степени превышения контролируемым параметром соответствующего порога.

Если контролируемый параметр находился в допустимых пределах  $I_c < I_n$  (где  $I_c$  – сила тока, протекающего в электрической сети;  $I_n$  – пороговое значение силы тока, при котором должен сработать ЭАЗ), то такое состояние идентифицировалось как исправное.

Если контролируемый параметр находился в пределах  $I_c > I_n$ , то такое состояние идентифицировалось как отказ.

По результатам ЭИ установлено изменение наработки на отказ ЭАЗ в зависимости от силы тока. Предложенная методика показывает, что чем больше электрический ток, тем меньше время работы ЭАЗ электросети.

Многочисленные исследования [4-9] определения наработки на отказ и повышения надёжности электротехнических средств сводятся к статистическому, аналитическому инструментарию, определению наработки на отказ в зависимости от изменений одного фактора.

В [5] приводится зависимость статического подхода к прогнозу срока службы методом ускоренных испытаний, срок службы или время жизни при этом предлагается определять по эмпирической формуле [4].

В [10] предложена методика, описывающая наработку на отказ и износ технических устройств как некоторый эмпирически обоснованный функционал, зависящий от значимых эксплуатационных параметров (типа автомобиля, возраста, пробега, дорожных и климатических условий, качества технического обслуживания и хранения и т.д.). Интенсивность потока отказов тогда может быть представлена в виде производной от интегральной функции износа, экспоненциально зависящей от величины наработки на отказ.

Такой подход представляется оправданным для ЭАЗ, отличительные особенности которых, в сравнении с объектами другой сферы деятельности, проявляются в относительно большой длительности эксплуатации. Исходя из это-

го, при моделировании различных эксплуатационных показателей ЭАЗ, отражающих характеристики их качества и надёжности, необходимым учётом временного фактора [8]. На эксплуатационную надёжность ЭАЗ оказывают существенное влияние не только временной фактор, но и режим работы, параметры сети (напряжение, сила тока, сопротивление, температура, выделяющаяся при протекании электрического тока), в которой они эксплуатируются, а также качество технического обслуживания.

Авторами сделано следующее предположение: обобщенную наработку  $D$  ЭАЗ электросети следует представить некоторым эмпирически обоснованным функционалом:

$$D = F(t, f, T, Q), \quad (1)$$

в котором учитывается динамика основных эксплуатационных факторов: срок эксплуатации ( $T$ ), параметры, отражающие условия эксплуатации (температурный ( $t$ ) и влажностный режим ( $f$ )), суммарный электрический заряд, прошедший через ЭАЗ ( $Q$ ). Полный дифференциал в пространстве основных переменных  $T$  и  $Q$  имеет вид:

$$dD = G(t, f, T) \delta T + S(Q, t, f) \delta Q, \quad (2)$$

где  $G(t, f, T)$  и  $S(Q, t, f)$  представляют собой функции, явно зависящие от вышеуказанных факторов.

Отказы, возникающие в ходе эксплуатации объектов техники, описываются чаще всего  $U$ -образной функцией Вейбулла с различными параметрами. Предположим, что функцию Вейбулла можно представить как суперпозицию двух функций отказов, которые описывают динамику различающихся по природе происхождения отказов. Определим их как функцию отказов первого рода, связанную с развитием дефектов при изготовлении устройства, и функцию отказов второго рода, связанную с физическим износом изделия. При моделировании отказов ЭАЗ будем использовать функцию отказов второго рода, которая описывается экспоненциальным распределением [10].

Предположим, что количество элементов некоторой совокупности ЭАЗ, находящихся в работоспособном состоянии, зависит от величины наработки  $D$ :

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu D}, \quad (3)$$

где  $N_0$  – первоначальное количество элементов, указанное в совокупности;

$N$  – количество оставшихся работоспособных элементов при достижении наработки  $D$ .

Тогда вероятность того, что ЭАЗ находится в работоспособном состоянии, определяется как функция наработки  $D$ , имеющая экспоненциальный вид:

$$P = e^{-\mu D}. \quad (4)$$

Определим интенсивность отказов от наработки  $\lambda_D$  некоторой совокупности ЭАЗ как полную производную по наработке  $D$ :

$$\lambda_D = \frac{\partial N}{N_0 \partial D} = \frac{dP}{dD} = -\mu P. \quad (5)$$

Для нахождения интенсивности отказов  $\lambda_T$  по времени перейдем в (4) к полной производной по времени и, учитывая (2), получим:

$$\lambda_T = \frac{dN}{N_0 dt} = \frac{dP}{dD} \frac{dD}{dt} = -\mu N (G(t, f, T) + S(Q, t, f)). \quad (6)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что износ при эксплуатации ЭАЗ в наибольшей степени зависит от суммарного заряда, прошедшего через сечение проводника, поэтому, в первом приближении, можно пренебречь влиянием факторов, действующих во времени (температурный ( $t$ ) и влажностный режим ( $f$ )), то есть принять в (2):

$$G(t, f, T) \ll S(Q, t, f).$$

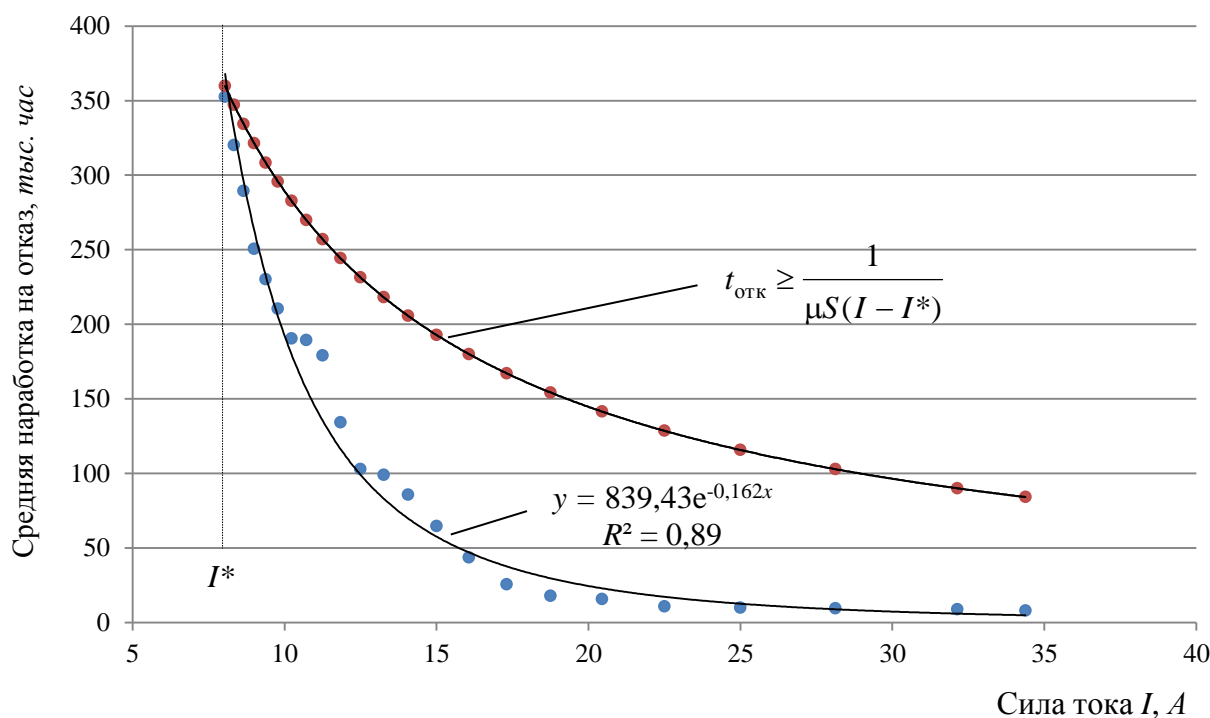
Тогда интенсивности отказов  $\lambda_T$  во времени будет зависеть только от силы тока:

$$\lambda_T = \frac{dN}{dt} = -\mu SI. \quad (7)$$

Средняя наработка на отказ для одной группы изделий к моменту времени при одинаковой интенсивности определяется выражением:

$$t_{\text{отк}} = \frac{1}{\lambda_T} = \frac{1}{\mu SI}. \quad (8)$$

Предложенный подход показывает, что чем больше сила электрического тока, тем меньше время работы ЭАЗ электросети (рис. 2), что подтверждает результаты проведенных ранее ЭИ [1]. Следовательно, с увеличением силы электрического тока вероятность того, что ЭАЗ не сработает, увеличивается, то есть стремится к максимуму.



- Зависимость, полученная при проведении экспериментального исследования;
  - Зависимость, полученная при моделировании основных эксплуатационных факторов через эмпирически обоснованный функционал;
- $I^*$  – минимальное значение силы тока, при котором работоспособность электрических аппаратов защиты будет максимальной

**Рис. 2.** Зависимость наработки на отказ от силы тока, полученная при проведении экспериментального исследования и при моделировании основных эксплуатационных факторов через эмпирически обоснованный функционал обобщённой наработки на отказ электрических аппаратов защиты

Подход к определению основных эксплуатационных факторов ЭАЗ электросети через эмпирически обоснованный функционал обобщенной наработки на отказ ЭАЗ подтверждает адекватность предложенной методики экспериментального определения их наработки на отказ.

## Литература

1. **Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Минеев Е.Н.** Методика экспериментального определения наработки на отказ электрических аппаратов защиты // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (56). 2014. С. 104-109. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
2. **Коган Л.М.** Оптимизация надёжности АСУТП при проектировании. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
3. **Шеметов А.Н.** Надёжность электроснабжения: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006.
4. **Волков А.Н.** Анализ прогнозирования надёжности длинно-канальных полевых транзисторов с применением степенной зависимости срока службы  $T_L$  от тока подложки  $I_{SUB}$  // Надёжность. № 4 (55). 2015.
5. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2-х частях. Часть 2. М.: Техносфера, 2004. 536 с.
6. **Певзнер Л.Д.** Надёжность горного электрооборудования и технических средств шахтной автоматики. М.: Недра, 1983. 198 с.
7. **Лубков Н.В., Степаняц А.С.** Аналитические методы оценки надёжности технических систем // Измерения, контроль, автоматизация. 1979. № 2 (18). С. 45-53.
8. **Богомолов В.С.** Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования // Вестн. ВИИИЭ. 1997. С. 25-32.
9. **Исаев И.П., Матвеевичев А.П., Козлов Л.Г.** Ускоренные испытания и прогнозирование надёжности электрооборудования локомотивов. М.: Транспорт. 1984. 248 с.
10. **Прус Ю.В., Ле Тхань Бинь, Алехин Е.М., Климовцов В.М.** Методика оценки показателей надёжности автомобильной пожарной техники // Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 2 (54). С. 23-29. <http://ipb.mos.ru/ttb>.