

Показатель надежности — требование на срабатывание

О.Г. Захаров

В разделе 3.6 нормативного документа [1] приведены два показателя надежности цифровых устройств релейной защиты, в названии которых использованы слова «требование на срабатывание»:

- средняя вероятность отказа в срабатывании устройства за год (при появлении требования) [2];
- параметр потока ложных срабатываний устройства в год (при отсутствии требования) [3].

Эти два показателя можно встретить практически во всех работах по надежности цифровых устройств релейной защиты, а также в других работах, например посвященных надежности пожарных извещателей [4].

Для первого из них в документе [1] рекомендуется выбирать одно из двух значений: 10^{-5} или 10^{-6} .

Для второго в этом же документе рекомендованы иные значения, отличающиеся на порядок: 10^{-6} или 10^{-7} .

Примечательно, что рекомендованные значения для второго из рассматриваемых показателей приведено и в стандарте [5], но представляет собой значение совсем другого порядка — 0,0011/год.

Выбирая любое из рекомендованных значений того или иного показателя и фиксируя их в технических условиях на изделие [6, 7], разработчик и производитель должны предусмотреть методику оценки их фактических значений.

Обычно достигнутые значения показателей определяют при контрольных испытаниях на надежность, однако в нормативной и технической литературе отсутствуют какие-либо методики определения рассматриваемых показателей, что делает невозможным их оценку применительно к цифровым устройствам релейной защиты.

Прежде чем предложить методики оценки этих показателей, основанные на информации, получаемой от потребителей, эксплуатирующих цифровые устройства релейной защиты, рассмотрим сами показатели подробнее.

Первый из двух рассматриваемых показателей, характеризует совмещение двух независимых событий:

- отказ устройства (событие A);
- требование на срабатывание (событие B).

Если вероятность отказа цифрового устройства зависит от его надежности, то возникновение требования на срабатывание определяется характеристиками энергосистемы, в которой это устройство эксплуатируется.

Как известно [8], вероятность одновременного возникновения двух независимых событий может быть определена как произведение вероятностей каждого из этих событий:

$$P(AB) = Q(A) \cdot P(B), \quad (1)$$

где $Q(A)$ — вероятность отказа устройства; $P(B)$ — вероятность появления требования на срабатывание.

Из приведенной формулы следует, что данный показатель нельзя отнести к индивидуальным характеристикам надежности устройства, так как его значение зависит и от свойств системы, в которой используется цифровое устройство.

Для оценки вероятности отказа устройства $Q(A)$ воспользуемся результатами, изложенными в [9, 10].

Наработка на отказ, определенная по экспериментальным данным, полученным от организаций, эксплуатирующих цифровые устройства релейной защиты и автоматики, составила $T_0 = 125\,000$ ч. Вероятность безотказной работы устройства за первый год (8760 ч) эксплуатации при такой наработке на отказ находим по формуле:

$$P(A) = e^{-t/T_0} = e^{-8760/125000} = 0,932. \quad (2)$$

Для данного значения наработки на отказ график изменения вероятности безотказной работы приведен на рис. 1.

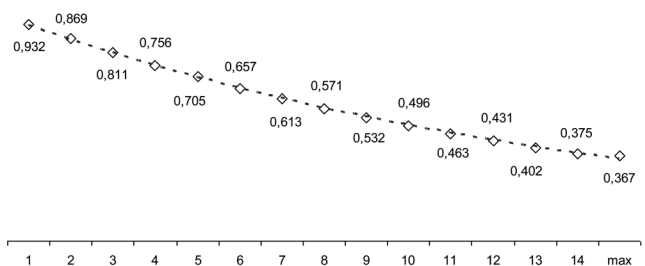


Рис.1. Изменения вероятности безотказной работы устройств при $T_0 = 125\,000$ ч

Вероятность отказа устройства $Q(A)$ на первом году эксплуатации найдём по формуле для суммы противоположных событий:

$$Q(A) = 1 - P(A) = 1 - 0,932 = 0,068. \quad (3)$$

Если ориентироваться на заведомо наихудший случай и предположить, что при отказе устройства

оба события — появление требования на срабатывание устройства, формируемого электрической системой, или отсутствие требования на срабатывание — равновероятны, можно оценить значение вероятности события B как $P(B) = 0,5$.

Подставив значения $Q(A)$ и $P(B)$ в формулу (2) можно получить следующую грубую (явно завышенную) оценку значения показателя «средняя вероятность отказа в срабатывании устройства за первый год эксплуатации (при появлении требования)» для рассматриваемого класса цифровых устройств:

$$P(AB)_{0,5} = Q(A) \cdot P(B) = 0,068 \cdot 0,5 = 0,034. \quad (4)$$

Однако на самом деле значение $P(B)$ значительно меньше 0,5, так как в любой электрической системе «требование на срабатывание» формируется ограниченное число раз, а всё остальное время для системы характерно «отсутствие требования на срабатывание».

Для получения более точной оценки показателя необходимо знать число срабатываний защит в электрической системе за год и число отказавших за этот же период цифровых устройств.

Например, по данным ООО «НТЦ «Механотроника», в 2011 г. к цифровым блокам релейной защиты, эксплуатирующимся на энергетических объектах ОАО «Российские железные дороги», была предъявлена одна претензия. За тот же период на этих объектах зафиксировано 515 отключений. В данном случае значение $P(B)$ может быть оценено как $1/515 = 0,0019$.

Кроме того, следует учитывать, что на любом энергетическом объекте одновременно находятся в эксплуатации изделия с разной наработкой. Так как с увеличением наработки вероятность отказа будет только расти, то вероятность отказа устройства на первом году работы можно рассматривать как минимальное значение для любого из цифровых устройств, установленных на данном энергетическом объекте.

Учитывая это и подставив полученное значение $P(B)$ в формулу (2), можно найти

$$P(AB)_{\min} = 0,068 \cdot 0,0019 = 0,00013. \quad (5)$$

Полученное по формуле (5) значение $P(AB)_{\min} = 0,00013$ для изделий с наработкой на отказ $T_0 = 125\,000$ ч на первый взгляд представляется не соответствующим ни одному из двух значений (10^{-5} или 10^{-6}), рекомендованных в руководящем документе [1], и отличается от них не менее чем на порядок.

Поэтому считаю необходимым обратить внимание на правильность задания рекомендованных значений показателей в документе [1].

При $Q(A) = 10^{-5}$ вероятность безотказной работы изделия:

$$P(A) = 1 - Q(A) = 1 - 0,00001 = 0,99999. \quad (6)$$

Используя формулу (2) можно определить минимальное значение наработки на отказ $T_{0ф}$, которое соответствует значению $P(A) = 0,99999$

$$T_{0ф} = -8760 / \ln 0,99999 = -8760 / (-0,00001) = 876 \cdot 106. \quad (7)$$

Таким образом, оказывается, что при $Q(A) = 10^{-5}$ фактическое значение наработки на отказ $T_{0ф}$ должно, как минимум, в несколько тысяч раз превышать рекомендованное значение наработки на отказ $T_0 = 125\,000$ ч, заданное в этом же документе.

Произведённые по формулам (2), (6) и (7) вычисления позволяют обоснованно предположить, что в руководящем документе [1] неправильно заданы значения вероятности отказа в срабатывании устройства.

При необходимости оценки вероятности безотказной работы за второй и последующие годы эксплуатации использовать формулу (2) нельзя, так как после подстановки в неё значения $t = n \cdot 8760$ (число часов в n годах продолжительностью каждый 365 дней) получим значение вероятности безотказной работы за n прошедших лет, а не за n -й год.

Предположив, что за каждый год работы изделия наработка на отказ уменьшается на значение $t = 8760$ и можно предложить формулу, которая позволит оценить вероятность безотказной работы за n -й год:

$$P(A) = e^{-8760/[T_0 - (n-1)8760]} = e^{-1/[T_{01} - (n-1)]}, \quad (8)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — год, для которого необходимо оценить вероятность безотказной работы; T_{01} — наработка на отказ, годы.

При $n = 1$ (т. е. для первого года) формула (8) даёт тот же результат, что и формула (2). Одинаковый с формулой (2) результат формула (8) даёт и для того года, когда наработка на отказ T_0 будет «израсходована» полностью.

График изменения вероятности безотказной работы, определённой по формуле (8) для $T_0 = 125\,000$ ч ($T_{01} = 14,23$ года), приведён на рис. 2.

Особенностью данного графика является ограниченная область определения: при превышении фактическим временем текущей наработки заданного времени наработки на отказ $T_{01} > T_0$ формула (8) теряет физический смысл.

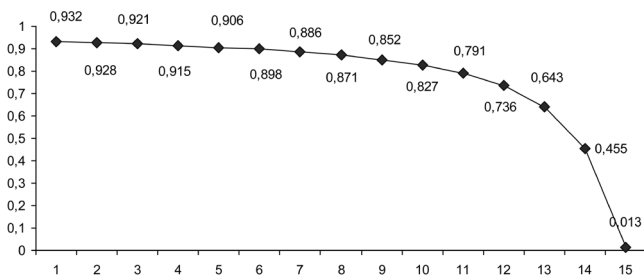


Рис. 2. Вероятность безотказной работы устройства в n-м году при $T_0 = 125\,000$ ч ($T_{01} = 14,23$ года)

Здесь необходимо ещё раз обратить внимание на то, что показатели $P(A)$ и $Q(A)$ характеризуют надёжность цифрового устройства, тогда как вероятность появления требования на срабатывание определяется характеристиками электрической системы, в которой установлены эти устройства. Именно эта особенность и делает неправильным включение показателя «средняя вероятность отказа в срабатывании устройства за год (при появлении требования)» в технические условия на цифровой блок релейной защиты [6, 7].

Второй из рассматриваемых в этом разделе показателей — «параметр потока ложных срабатываний устройства в год (при отсутствии требования)» — также характеризует совмещение двух независимых событий:

- ложное срабатывание устройства (событие C), которое зависит от надёжности устройства;
- отсутствие требования на срабатывание (событие D).

Если использовать терминологию, установленную в [5], то название этого показателя надёжности должно быть сформулировано так: параметр потока ложных срабатываний устройств w , где ложное срабатывание — срабатывание при отсутствии требований.

Данное определение термина лучше, чем используемое многими специалистами определение ложного срабатывания, как срабатывания при отсутствии короткого замыкания [11]. Если ограничиться последним определением, то из рассмотрения оказываются исключёнными те алгоритмы защиты, автоматики и сигнализации, условия срабатывания которых не связаны с наличием или отсутствием короткого замыкания.

Подтверждением сказанного служит определение понятия «ложное срабатывание», приведенное в [12]:

«Ложное срабатывание — это срабатывание при отсутствии требования срабатывания для данного и для других устройств РЗА, а также передача

в этих же условиях сигнала на другое устройства РЗА, происходящее, как правило, из-за различных помех, механических воздействий на устройства РЗА, неправильных действий персонала и др.»

В некоторых работах по релейной защите, например в [11], ложное срабатывание наряду с излишним срабатыванием и другими неправильными действиями защиты, отнесены к **отказам** функционирования релейной защиты, что нельзя считать корректным.

Тем не менее, похожее определение понятия «ложное срабатывание» дано и в стандарте [13]:

«Ложное срабатывание — отказ объекта, работающего в сложном режиме, приводящий к включению его в работу при отсутствии требования на включение. Ложные срабатывания характерны как для быстродействующих, так и длительнодействующих управляющих систем, а также оборудования, выполняющего функции управления».

Как видно из процитированных определений, ложные срабатывания устройств могут происходить по разным причинам, далеко не всегда имеющим отношения к надёжности устройства релейной защиты.

Часть **внешних** причин обусловлена поступлением на различные порты¹ (рис. 3) устройства электромагнитных помех, на которые оно реагирует так, как если бы было сформировано требование **на срабатывание**.



Рис. 3. Порты устройства

Для исключения таких причин ложных срабатываний, устройства должны отвечать определенным требованиям по электромагнитной совместимости.

Например, в работе [14] рассмотрены требования к портам электропитания цифровых устройств, обеспечивающие их правильную работу в условиях тяжелой помеховой обстановки.

Даже если цифровое устройство отвечает всем требованиям по помехозащищенности, при

¹ Порт — граница между техническим средством (ТС) и внешней электромагнитной средой (зажим, разъем, клемма, стык связи и т.п.). Порт корпуса — физическая граница ТС, через которую могут излучаться создаваемые ТС электромагнитные поля или проникать внешние электромагнитные поля.

проектировании электроустановки необходимо руководствоваться рекомендациями, изложенными в отраслевых нормативных документах [15, 16].

Аналогичные по своей сути рекомендации, выполнение которых уменьшает негативные последствия от электромагнитных помех используют и в других отраслях техники [17].

Для устройств релейной защиты характерна ещё одна группа внешних воздействий, которые могут быть восприняты исправным цифровым устройством как требование на срабатывание, а произошедшее после этого срабатывание устройства будет оценено как ложное.

Для исключения таких ложных срабатываний в схемах релейной защиты предусматривают блокирующие устройства (см., например, [18], с. 243), а в цифровых устройства — алгоритмы, блокирующие их работу.

Правильнее такие причины рассматривать как дефекты схемных решений [19], приводящие к некорректной работе устройств или алгоритмов защиты.

Суммируя все сказанное можно утверждать, что рассмотренные **внешние причины** нельзя отнести к характеристикам надежности устройства.

Непрерывное наблюдение за работой цифровых устройств производства НТЦ «Механотроника» подтверждает, что именно несоблюдение рекомендаций, приведенных в отраслевых документах [15, 16], наиболее часто является внешними причинами ложных срабатываний цифровых устройств при отсутствии требования на срабатывание [20, 21].

Для характеристики надежности устройства целесообразно рассматривать только те «ложные срабатывания», которые вызваны внутренними причинами, когда отказ того или иного элемента устройства приводит к срабатыванию устройства таким образом, как оно сработало бы при наличии требования на срабатывание.

Такой подход позволяет статистически определить показатель «поток ложных срабатываний», характеризующий надежность устройства, по формуле, аналогичной применяемой для оценки потока отказов $\mu(t)$ в стандарте [22]:

$$w(t) = [R(t_2) - R(t_1)] / (t_2 - t_1), \quad (9)$$

где $w(t)$ — параметр потока ложных срабатываний; $R(t_2)$ — число ложных срабатываний к моменту времени t_2 ; $R(t_1)$ — число ложных срабатываний к моменту времени t_1 . Причем $t_1 \leq t \leq t_2$.

Кроме этого, для оценки верхнего значения этой характеристики устройства можно рассматривать все отказы устройства за время наблюдения как его

ложные срабатывания, а для оценки потока ложных срабатываний использовать формулу, приведенную в стандарте [22]:

$$w(t)_{\max} < 1/T_0, \quad (10)$$

где $w(t)_{\max}$ — верхняя граница параметра потока ложных срабатываний; T_0 — наработка на отказ.

В связи с тем что основные причины ложных срабатываний являются внешними по отношению к устройству, не зависят от его надежности, а определяются принятыми схемными решениями и корректным соблюдением требований по электромагнитной совместимости, регламентированных нормативными документами, использование показателя «параметр потока ложных срабатываний w » в технических условиях на цифровые устройства требует дополнительного обоснования.

Литература

1. РД 34.35.310–97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем // М.: ОРГРЭС. 1997.
2. Захаров О.Г. Требование на срабатывание // <http://rza.org.ua/article/read/Trebovanie-na-srabatyvanie> — Zaharov-O-G.html. Вариант этой заметки расположен на <http://www.energoboard.ru/articles/3019-trebovanie-na-srabativanje.html>.
3. Захаров О.Г. Ложное срабатывание // <http://www.energoboard.ru/articles/3040-lognoe-srabativanje.html>.
4. Надежность систем пожарной сигнализации // http://www.secur.ru/article.php?id_catalog=9&id_position=141.
5. ГОСТ 25804.2–83. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Требования по надежности.
6. ДИВГ.648228.001 ТУ. Блоки микропроцессорные релейной защиты БМРЗ. Технические условия.
7. СТО ДИВГ-050–2012. Блоки микропроцессорные релейной защиты БМРЗ. Технические условия.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1969.
9. Гондуров С.А., Захаров О.Г. Способ оценки наработки на отказ по результатам эксплуатации для устройств релейной защиты и автоматики // СТА (Современные технологии автоматизации). 2010. № 3. С. 88.
10. Гондуров С.А., Захаров О.Г. Определение наработки на отказ по результатам эксплуатации // <http://rza.org.ua/article/read/Opredelenie-narabotki-na-otkaz-po-rezul-tatam-ekspluatatsii> — Gondurov-S-A—Zaharov-O-G-_77.html.
11. Шалин А. Микропроцессорные реле защиты: необходим анализ эффективности и надежности//

Новости электротехники. 2006. № 2 (38). // <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/38/13.php>

12. **Функции** релейной защиты и автоматики и основные требования, предъявляемые к этим устройствам // <http://relay-protection.ru/content/view/285/58/>.

13. **ГОСТ 26291–84 (СТ СЭВ 4334–83)**. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей. М.: Издательство стандартов, 1985.

14. **Захаров О. Г.** Требования к портам оперативного питания в технических условиях цифровых устройств релейной защиты. // http://rza.org.ua/article/read/Trebovaniya-k-portam-operativnogo-pitaniya-v-tehnicheskikh-usloviyah-tsifrovih-ustroystv-releynoy-zashchiti—Zaharov-O-G—_93.html.

15. **СТО 56947007–29.240.043–2010**. Руководство по обеспечению электро-магнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электро-сетевых объектов. М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик». 2010.

16. **СТО 56947007–29.240.044–2010**. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик». 2010.

17. **Р 78.36.013–2002**. Рекомендации. Ложные срабатывания технических средств охранной сигнализации и методы борьбы с ними. М.: МВД РФ. 2002.

18. **Чернобровов Н. В., Семенов В. А.** Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат. 1998.

19. **Захаров О. Г.** Определение дефектов в релейно-контакторных схемах. М.: Росагропромиздат, 1991.

20. **Захаров О. Г.** Как не надо заземлять // <http://maximarsenev.narod.ru/Zazeml2.pdf>.

21. **Захаров О. Г.** Надежность релейной защиты: создание и разоблачение мифов // <http://relay-protection.ru/content/view/99/11>.

22. **ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике.** Основные понятия. Термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1991.