

О.Г. ЗАХАРОВ

НАДЕЖНОСТЬ цифровых устройств РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Показатели. Требования. Оценки.

ISBN 978-5-9729-0073-2



9785972900732



Инфра-Инженерия

УДК 621.311.019.3

ББК 31.27-05

338

Захаров О.Г.

338 Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки. – М.: Инфра-инженерия, 2014. – 128 с.

ISBN 978-5-9729-0073-2

В книге проанализированы и систематизированы требования к надежности цифровых устройств релейной защиты, регламентированные в нормативных документах. На основе опыта аттестации и сертификации цифровых устройств в различных организациях даны предложения по номенклатуре показателей надежности, приводимой в технических условиях.

Рассмотрены используемые в практике способы оценки, основанные на статистической обработке информации о правильных и неправильных срабатываниях защит.

Даны примеры оценок выбранных показателей надежности на основе информации, получаемой от эксплуатирующих организаций, с применением стандартных планов и методов контрольных испытаний на надежность.

Приведена статистическая информация об отказах устройств и применяемых в них элементов. Дана информация о поведении цифровых устройств релейной защиты при экстремальных воздействиях.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся разработкой, проектированием и эксплуатацией цифровых устройств релейной защиты, а также может быть полезна научным работникам, преподавателям, аспирантам и студентам соответствующих дисциплин средних и высших учебных заведений.

Издание подготовлено к печати в авторской редакции

Подписано в печать 25.01.2014. Формат 84х108/32. Бумага офсетная.

Гарнитура «Прагматика». Объем 14 печ. л. Тираж 500 экз. Заказ №288

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ»

Тел.: 8(911)512-48-48

E-mail: Infra-e@yandex.ru

www.infra-e.ru

***Издательство «Инфра-Инженерия»
приглашает к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы.***

© Захаров О.Г., автор, 2014

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2014

ISBN 978-5-9729-0073-2

1. Показатели надежности в нормативных документах

Номенклатура показателей надежности для ЦРЗА зафиксирована в основополагающем отраслевом документе [34].

Существенная часть раздела 3 «Требования надежности» отведена перечню рекомендаций, выполнение которых, по мнению разработчика этого документа, поможет достичь необходимого уровня надежности ЦРЗА.

Учитывая, что данный документ не распространяется на процесс проектирования цифровых устройств, включение этих рекомендаций в данный документ, а тем более в технические условия на изделия, представляется излишним.

Другая часть этого раздела отведена номенклатуре показателей надежности [53] и их нормированным значениям, но выполнена она с отступлением от рекомендаций, изложенных в стандарте [21].

Для выбора рациональной номенклатуры показателей надежности, в которую включено минимально необходимое и достаточное количество показателей, уточним признаки (табл. 1), которыми можно охарактеризовать ЦРЗА в соответствии с требованиями стандарта [21].

Номенклатура показателей надежности цифровых устройств релейной защиты, автоматики, управления и сигнализации, установленная в настоящее время нормативными документами [19, 34], приведена в табл. 2, где знаком * отмечены показатели, для которых в стандарте [20] даны определения обозначаемых ими понятий.

В связи с тем, что данные изделия перед началом эксплуатации подлежат хранению, для них должны быть заданы по-

Признаки, характеризующие надежность ЦРЗА

Признак по [21]	Характеристика изделия	Описание
Определенность назначения	ИКН ¹	Изделие имеет единственный вариант применения
Число возможных состояний	Вид II	Изделия, кроме работоспособного и неработоспособного состояний, могут находиться в некотором числе частично неработоспособных состояний
Режим применения	НДП ²	Изделие функционирует непрерывно и длительно
Последствие отказа	-	Отказ изделия или его переход в предельное состояние не приводит к катастрофическим (критическим) последствиям
Возможность восстановления	Восстанавливаемое	Работоспособное состояние данных изделий может быть восстановлено после их отказа
Способ восстановления	-	Обезличенный ремонт заменой модулей
Характер перехода в предельное состояние	Стареющее	Переход данных изделий в предельное состояние, когда их эксплуатация должна быть прекращена, определяется старением
Способ восстановления	-	Ремонт обезличенным способом
Возможность технического обслуживания	Обслуживаемое	Необходимо периодическое техническое обслуживание
Характер отказов	Наличие сбоев	При наличии в устройстве средств вычислительной техники
Контроль перед применением	Контролируемое	При необходимости контроля изделия перед применением

казатели сохраняемости [17, 55] и учтены условия и режимы хранения, для которых действуют эти показатели.

В табл. 2 перечислены несколько показателей надежности, в названии которых использованы слова «сменный элемент».

Обычно сменные элементы используют в устройствах, состоящих из элементов разной надежности или имеющих разный ресурс, а также содержащих быстроизнашивающиеся части, которые при определенных условиях следует заменить на новые.

¹ ИКН – изделие конкретного назначения.

² НДП – непрерывное длительное применение.

**Показатели надежности
в нормативных документах [19, 34]**

Показатели	Обозначение	Нормативный документ	
		[34]	[19]
Безотказности			
Наработка на отказ*	T_0	-	+
Наработка на отказ СЭ ³	-	+	
Параметр потока ложных срабатываний (при отсутствии требования)		+	
Временные понятия			
Срок службы*	$T_{сл}$	-	+
Срок службы СЭ		+	
Срок службы:			
- установленный	$T_{слу}$	-	+
- назначенный*		-	-
Долговечности			
Гамма-процентный ресурс*	$T_{р\gamma}$	-	+
Средний срок службы*			
Полный средний срок службы	-	+	-
Ремонтопригодности			
Среднее время:			
- восстановления*	$T_{в}$	+	+
- замены СЭ	$T_{в}$	+	-
Сохраняемости			
Срок сохраняемости:			
- средний (гамма-процентный)	$T_{с\gamma\%}$	-	+
- гамма-процентный*	$T_{с\gamma\%}$		
- средний*	$T_{ссп}$	-	-
Иные			
Средняя вероятность отказа в срабатывании (при появлении требования)		+	
Удельная суммарная продолжительность ТО ⁴	$S_{ТО}$	-	+

В электромеханических реле сменными элементами являются контакт-детали, катушки и т.п.

В связи с тем, что большинство изготовителей цифровых устройств не поощряет самостоятельный ремонт выпущенных ими изделий силами потребителя, сменными элементами в

³ СЭ – сменный элемент.

⁴ ТО – техническое обслуживание.

таких устройствах могут быть модули и узлы, которые изготовитель поставляет с соответствующими документами⁵.

Например, к некоторым цифровым устройствам, по отдельному заказу поставляют модули:

- центрального процессора;
- ввода-вывода;
- трансформаторов и др.

Силами потребителя могут быть заменены не только перечисленные здесь модули, но и дисплей, модуль пульта и некоторые другие.

При проектировании цифровые устройства разрабатывают таким образом, чтобы надежность их модулей была одинаковой. Поэтому по отношению к таким модулям примечание **«Значения показателей надежности сменных элементов различного назначения могут отличаться»**, содержащееся в РД [34], нельзя признать корректным.

Учитывая изложенное, из рассматриваемого документа и, соответственно из табл. 2, должны быть исключены показатели, относящиеся к надежности абстрактного «сменного элемента», а вместо них должны быть установлены такие показатели надежности:

- средняя наработка цифрового устройства на отказ;
- среднее время восстановления цифрового устройства;
- средний срок службы цифрового устройства.

Показатель безотказности **«средняя наработка на отказ»** (краткая форма – **наработка на отказ**) в стандарте [20] определен следующим образом: «отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки».

О том, как можно оценить этот показатель на основании информации, получаемой от потребителя, будет рассказано ниже.

Следует отметить, что наработка на отказ изделия не зависит от того, какой элемент в нем отказал – сменный или нет и, следовательно, использование показателя «наработка на отказ сменного элемента», установленного в [34], методически неправильно [57].

⁵ Следует также учитывать, что выбор «сменного элемента» во многом задает глубина поиска дефекта системой самодиагностики цифрового устройства [3].

В табл. 2 приведено несколько временных⁶ показателей надежности и показателей долговечности, в названии которых использованы слова **«срок службы»** или «ресурс».

Строго говоря, показатели, в названии которых использованы слова «срок службы», представляют собой **технико-экономические характеристики изделия**, а не показатели его надежности.

Ориентируясь на стандарт [20], оставляем для дальнейшего рассмотрения только два показателя:

- временной⁶ показатель **«назначенный срок службы»**;
- показатель долговечности **«средний срок службы»**.

Все остальные показатели, включая и те, в которых использованы слова «срок службы сменного элемента», исключаем из дальнейшего рассмотрения.

В связи с тем, что для ЦРЗА не предусмотрены плановые ремонты, использование показателя **«полный средний срок службы»** [34] представляется методически некорректным.

Показатель долговечности **«гамма-процентный ресурс»** отсутствует в [34], но предусмотрен в [19]. Необходимость использования этого показателя рассмотрим ниже, в соответствующем разделе данной книги.

Используя обоснования, приведенные в [55], оставляем для дальнейшего рассмотрения два показателя сохраняемости: **«гамма-процентный срок сохраняемости»** и **«средний срок сохраняемости»**, а предусмотренный стандартом [19] показатель «средний (гамма-процентный) срок сохраняемости» исключаем из дальнейшего рассмотрения.

Показатель «Удельная суммарная продолжительность ТО» отнесен к показателям, используемым для определения удельных показателей конкретных типов и видов низковольтных комплектных устройств, и, по мнению автора данной книги, включать его в раздел 3 «Показатели надежности» стандарта [19] нет необходимости.

Вне всякого сомнения, проведение ТО своевременно и в полном объеме помогает поддерживать работоспособное состояние изделия, но по своей сути этот показатель не относится к показателям надежности, что также позволяет исключить его из дальнейшего рассмотрения.

⁶ При назначении срока службы принимают во внимание прогнозируемый или достигнутый сроки службы.

Показатель «параметр потока ложных срабатываний (при отсутствии требования)» предусмотрен также и в других стандартах, например в [29], где дано рекомендуемое значение этого показателя – 0,0011/год.

Показатель «средняя вероятность отказа в срабатывании (при появлении требования)» встречается во многих изданиях по релейной защите, но определение понятия, обозначаемого этим термином, в них отсутствует, как отсутствует и в стандартах [20, 28]. Показатели надежности, в названиях которых использованы слова «требование на срабатывание», подробно рассмотрены ниже.

Отметим, что данная номенклатура показателей использована при разработке соответствующего раздела технических условий, выпущенного в форме стандарта организации [65, 78].

Сказанное позволяет перейти к рассмотрению методов и способов оценки показателей надежности, выполняемых при контрольных испытаниях на надежность изделий данного класса.

2. Формулы и надежность

В документе [35] предложено использовать как показатель качества работы релейной защиты коэффициент правильных действий защиты K , определяемый по формуле (1):

$$K = \frac{n_{\text{пс}}}{n_{\text{пс}} + n_{\text{ис}} + n_{\text{лс}} + n_{\text{ос}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $n_{\text{пс}}$ – число правильных срабатываний; $n_{\text{ис}}$ – число излишних срабатываний; $n_{\text{лс}}$ – число ложных срабатываний; $n_{\text{ос}}$ – число отказов срабатывания.

Понятно, что такой показатель как «вероятность отказа в срабатывании за год (при наличии требования)» [34] не может быть использован в этой формуле, использующей простой арифметический учет срабатываний или несрабатываний реле защиты.

Слово «надежность» в технических текстах часто используют в общепринятом смысле, когда им обозначают нечто внушающее доверие, верное, прочное, хорошо сработанное, достигающее цели [48]. К сожалению, такое расширенное использование термина «надежность» часто приводит к недоразумениям. Например, коэффициент K в документе [35] предложено использовать и для оценки надежности релейной защиты.

Такое предложение приводит к тому, что в некоторых работах предлагают такие «показатели надежности», как *надежность срабатывания* и *надежность несрабатывания*.

О «взаимосвязи» таких «показателей» на одном из форумов¹ можно прочесть следующий обмен мнениями:

¹ См.: <http://rzia.ru/topic85-filosofiya-zashchit-generatorov-p4.html>

stoyan пишет: «*Не надо забывать, что повышение надежности срабатывания понижает надежность несрабатывания*».

Cambric спрашивает: «*Что Вы имеете в виду: излишнее срабатывание или ложное срабатывание?*»

stoyan отвечает: «*И то и другое...*»

В действующих стандартах² предусмотрены такие характеристики реле:

- величина срабатывания;
- величина несрабатывания;
- нормируемый параметр несрабатывания и т.п.

В тех случаях, когда величина срабатывания задана двумя крайними значениями воздействующей величины, при одном из которых аппарат не должен срабатывать, а при другом должен срабатывать, то контроль срабатывания и несрабатывания следует проводить при этих двух значениях воздействующей величины.

Надежность реле характеризуется такими же показателями, как и надежность других технических средств, предусмотренных стандартом [20].

Сказанное позволяет утверждать, что правильность и неправильность срабатывания защиты, наличие излишних и ложных срабатываний, а также процентные соотношения между ними далеко не всегда связаны с надежностью устройства релейной защиты и тем более с надежностью цифровых устройств³ как технических объектов в смысле, установленном в стандарте [20].

Статистику различного рода срабатываний и несрабатываний правильнее рассматривать как характеристику совершенства схемы релейной защиты, применяемых в цифровых устройствах алгоритмов и адекватности используемых в них математических моделей.

Поэтому нельзя согласиться с тем, что с помощью формул и показателей можно оценить надежность срабатывания D (2), надежность несрабатывания S (3) и общую надежность R (4) релейной защиты⁴:

² См. ГОСТ 16022-83. Реле электрические. Термины и определения; ГОСТ 2933-83. Аппараты электрические низковольтные. Методы испытаний.

³ Информация о некоторых причинах ложных срабатываний приведена в [46].

⁴ Цитируется по книге: В.И. Гуревич. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы и перспективы. М.: «Инфра-инжиниринг», 2011, 336 с.

$$D=N_c/(N_c+N_F), \quad (2)$$

$$S=N_c/(N_c+N_U), \quad (3)$$

$$R=N_c/(N_c+N_F+N_U), \quad (4)$$

где N_c – количество правильных срабатываний защиты; N_F – количество отказов в срабатывании защиты; N_U – количество излишних (ложных) срабатываний защиты.

Сравнивая формулы (2)-(4) между собой, можно сделать вывод об их принципиальном сходстве. Небольшие различия вызваны только тем, что отдельные виды срабатываний по-разному объединены между собой.

Например, в формуле (1) сумма $(n_{nc} + n_{oc}) = n_{tc}$ интерпретируется как число требований на срабатывание, а излишние и ложные срабатывания рассматриваются как независимые друг от друга.

В формулах (3) и (4) излишние и ложные срабатывания не разделены, тогда как в формуле (1) их учитывают отдельно.

При этом ни в одной из формул (2), (3), (4) не использован ни один из показателей надежности технических объектов, установленных в [20].

С помощью таких формул вообще нельзя произвести «учет надежности», а можно только обработать полученную статистику разного рода срабатываний и несрабатываний защиты, причины которых, как это показано в документе [35], далеко не всегда имеют отношение к надежности технических средств, используемых в системах релейной защиты.

Тем не менее, в литературе можно найти многочисленные примеры использования процента правильных или неправильных действий релейной защиты для оценки ее «надежности».

Например, в [70] предложено для этих целей использовать формулу (5):

$$\Delta_{,\%} = \frac{\Omega_{и} + \Omega_{л} + \Omega_{о}}{\Omega_{и} + \Omega_{л} + \Omega_{с}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $\Omega_{и}$ – параметр потока излишних срабатываний (в простейшем случае – количество излишних срабатываний за год); $\Omega_{л}$ –

параметр потока ложных срабатываний; Ω_o – параметр потока отказов в срабатывании релейной защиты; Ω_c – параметр потока заявок на срабатывание (т.е. количество повреждений защищаемого объекта в год).

Эта формула отличается от формулы (1) не только тем, что входящие в нее составляющие названы с использованием слов из терминологии теории надежности (например, параметры потока). Числитель и знаменатель в формуле (5) отличаются друг от друга на $\delta\Omega=(\Omega_c-\Omega_o)$, а не так, как в формуле (1).

Показатель Δ в формуле (5) назван «**процент неправильных действий**» и поэтому логично предположить, что такой показатель должен дополнять **процент правильных действий**, рассчитанный по формуле (1), до 100%.

Однако из-за ряда различий (разные перечни срабатываний, различная их группировка и т.п.) этого не может быть, и результаты, полученные по формулам (1) и (5), нельзя сопоставить между собой.

В работе [69] для оценки эффективности функционирования предложено использовать усредненный статистический показатель работы h , названный процентом правильности действий:

$$h=h_{nc} \cdot 100 / (h_{nc} + h_{oc} + h_{ic} + h_{lc}), \quad (6)$$

где h_{nc} – правильность срабатываний; h_{oc} – отказ в срабатывании; h_{ic} – излишнее срабатывание; h_{lc} – ложное срабатывание.

В этой работе написано, что данный показатель позволяет «...оценивать соответствие устройств РЗА предъявляемым требованиям, их **надежность** и пригодность для эксплуатации...».

Сравнение формул (1) и (6) показывает их идентичность. Отличие их друг от друга состоит только в обозначении срабатываний. Поэтому все сказанное выше о невозможности оценки надежности релейной защиты на основе анализа статистики различных срабатываний и несрабатываний применимо и для этой формулы.

Продолжением такого подхода может служить формула (7)⁵:

⁵ В.И. Гуревич. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы и перспективы. М.: «Инфра-инжиниринг», 2011, 336 с.

$$M_{\Sigma_i} = \left(\frac{M_{S_i} + M_{D_i} + M_{P_i}}{N_i} \right) \cdot 100\% . \quad (7)$$

В формуле приняты такие обозначения:

- M_{S_i} – отказы реле i -го вида, не связанные с неправильными действиями релейной защиты, но требующие ремонта или замены «вышедших из строя»⁶ элементов и модулей;

- M_{D_i} – неправильные действия релейной защиты i -го вида, то есть излишние срабатывания при отсутствии аварийного режима или несрабатывания при аварийном режиме, не связанные с ошибками персонала;

- M_{P_i} – ошибки персонала, связанные с эксплуатацией, тестированием и программированием реле i -го вида, влияющие на правильность действия релейной защиты, выявленные до наступления неправильного действия защиты или после него;

- N_i – количество реле i -го вида, находящихся в эксплуатации в рассматриваемый период времени.

На самом деле, в этой формуле к надежности реле в смысле, установленном стандартом [20], имеет отношение только компонент M_{S_i} .

Все остальные компоненты этой формулы так или иначе связаны с «ошибками персонала» и не могут в таком виде характеризовать **надежность технического устройства**.

Некорректность введения такого показателя видна и в его определении, предлагающем учитывать ошибки персонала в зависимости от их выявления.

Нельзя не обратить внимания на то, что в определениях к формуле (7) не произведено различие между неправильными и излишними действиями защиты.

Поэтому вывод, сделанный в работе, где предложена эта формула⁷, неверен не потому, что в документе [35] использована формула (1), а потому, что такие формулы в принципе не имеют отношения к надежности, определяемой в соответствии с понятиями и терминологией, зафиксированными в стандарте [20].

Завершая обзор формул, предлагаемых разными авторами для оценки надежности, можно утверждать, что ни одна из

⁶ Правильно – отказ (сбой, поломка и т.п.). См. также [20].

⁷ «В России, как оказалось, учет надежности РЗ вообще не предусмотрен».

Содержание

Предисловие.....	3
1. Показатели надежности в нормативных документах.....	5
2. Формулы и надежность.....	11
3. Требования к надежности в технических условиях.....	18
4. Нарботка на отказ.....	27
5. Сохраняемость цифровых устройств.....	38
6. Надежность и требование на срабатывание.....	51
7. Надежность сменного модуля.....	60
8. Надежность БМАЧР в цифрах и фактах.....	63
9. Надежность устройств в цифрах и диаграммах.....	77
10. Технологический прогон цифровых устройств релейной защиты.....	89
11. Воздействие дуги и открытого пламени на цифровые устройства.....	101
Словарик.....	115
Литература.....	123