



Оценка показателей сохраняемости цифровых устройств релейной защиты

Олег Захаров

Приведена информация о показателях сохраняемости цифровых устройств релейной защиты и автоматики, показана возможность применения стандартных методов определения выбранного показателя с минимальными затратами, приведены результаты практического определения показателей сохраняемости методами, описанными в действующих стандартах.

Показатели сохраняемости в нормативных документах

В документе [1] требования к показателям сохраняемости цифровых устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) не установлены, поэтому некоторые изготовители микропроцессорных устройств релейной защиты в технических условиях указывают только назначенный срок хранения [2] в заводской упаковке, как это предписывалось старой редакцией документа [3]: «Срок хранения блока в упаковке и консервации изготовителя – 2 года со дня упаковывания». Условия хранения блоков заданы в [3] в соответствии с требованиями ГОСТ 23216-78 [4] в части воздействия как механических (условия С), так и климатических факторов (нижнее значение температуры – минус 45°C, верхнее значение температуры – плюс 60°C).

Действующая нормативная документация требует устанавливать не только назначенный срок хранения, но и **показатели сохраняемости** [2]:

- средний срок сохраняемости – $T_{с. ср}$;
- гамма-процентный срок сохраняемости – $T_{с. \gamma}$.

Для выбора одного из двух показателей сохраняемости необходимо оценивать «возможные последствия достижения предельного состояния или отказа при хранении и (или) транспортировании». Если отказ (достижение предельного состояния) изделия после хранения (транспортирования) не приводит к катастрофическим последствиям, то

рекомендуется использовать показатель $T_{с. ср}$. В том случае, когда после отказа или достижения предельного состояния изделия возможны катастрофические последствия, применяется показатель $T_{с. \gamma}$.

В последнем случае предполагается, что техническое состояние изделий можно контролировать.

Кроме самого показателя сохраняемости, в документации на изделие должны быть заданы условия и режимы хранения (транспортирования) по [4].

Ряд организаций, проводящих аттестацию продукции или экспертизу документации на неё, требуют включать в технические условия помимо назначенного срока хранения оба показателя сохраняемости и даже закрепляют это требование в своих отраслевых документах.

Из-за таких требований в последнюю редакцию технических условий [3] были введены оба показателя сохраняемости, что сделало необходимым произвести выбор стандартного метода их экспериментального определения для включения в программу и методику испытаний цифровых устройств релейной защиты и проведения контрольных испытаний, подтверждающих заданные значения показателей.

Метод оценки показателей сохраняемости

Из известных методов оценки показателей сохраняемости обратим внимание на **метод непосредственного хранения**,

установленный стандартом [5], а также рекомендованный в стандартах [6, 7] и ряде других нормативных документов.

Данный метод предполагает складку на длительное хранение испытываемых изделий на складе завода-изготовителя. В [8] для оценки показателей сохраняемости рекомендованы следующие планы испытаний:

- для гамма-процентного срока сохраняемости – план [NUR] – план испытаний, согласно которому испытывают **одновременно** N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r ;

- для среднего срока сохраняемости – план [NUT] – план испытаний, согласно которому **одновременно** испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T для каждого неотказавшего объекта.

Буквы в обозначениях планов испытаний означают:

- N – объём выборки;
- U – условие, согласно которому изделия в случае отказа не восстанавливают и не заменяют;
- T – продолжительность испытаний;
- r – число отказов или отказавших объектов.

Из описания планов испытаний [NUT] и [NUR] видно, что их принципиальное отличие от плана испытаний

[NMS], использовавшегося для оценки наработки этих же изделий на отказ [9], заключается в том, что в последнем случае изделия испытывались последовательно (и **не обязательно одновременно**), а отказавшие изделия ремонтировались.

Между тем метод непосредственного хранения [5], являясь, на первый взгляд, самым простым способом проведения испытаний для оценки показателей сохраняемости, оказывается, в конечном счёте, экономически нецелесообразным, так как предполагает одновременный вывод из оборота значительного количества изделий на срок не менее 24 месяцев. В связи с этим предлагается иной подход к оценке показателей, представленный в последующих разделах данной статьи на примере применения к конкретным цифровым устройствам релейной защиты, автоматики и сигнализации, используемым для защиты электроустановок и присоединений с напряжением от 0,4 до 220 кВ. Данный подход опирается на многолетний опыт работы ООО «НТЦ «Механотроника» с устройствами РЗА. Он использует стандартные планы испытаний и может быть распространён на другие аналогичные устройства, состоящие из компонентов, перечисленных в стандарте [5].

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГАММА-ПРОЦЕНТНОГО
СРОКА СОХРАНЯЕМОСТИ**

Отбор объектов для испытаний

Для отбора объектов, подходящих для испытаний, были проверены складские остатки предприятия по состоянию на день начала испытаний. В результате было выявлено 14 изделий двух типов, отличающихся только количеством входов и выходов, которые были переданы на хранение сразу после прохождения приёмо-сдаточных испытаний (табл. 1).

Отобранные изделия, условно обозначенные как изделия типов А и Ж, изгото-

товлены по одному технологическому процессу, состоят из одинаковых модулей и имеют одинаковое функциональное назначение. Для изготовления изделий этих типов применены одни и те же материалы и комплектующие электро-радиоэлементы. Всё это позволяет рассматривать совокупность изделий двух типов как выборку из 14 идентичных блоков и в дальнейшем распространить результаты испытаний изделий типа А на изделия типа Ж и наоборот.

Все перечисленные в табл. 1 изделия были сняты с хранения и переданы в ОТК для проведения приёмо-сдаточных испытаний (ПСИ) по той же самой программе, по которой испытывают все новые изделия. Результаты ПСИ показали, что после хранения в течение указанного в табл. 1 промежутка времени все контролируемые параметры и характеристики этих изделий соответствуют требованиям технических условий. Поэтому отобранные изделия можно использовать для экспериментальной оценки показателей сохраняемости.

Рассмотрим, как такой подход (использование для испытаний изделий, не переданных по каким-либо причинам потребителю) позволяет получить необходимую информацию о показателе сохраняемости изделий.

Нормализация времени испытаний выборки

Как следует из табл. 1, все изделия хранились на складе разное время – от 16 до 44 месяцев. Однако, согласно требованиям стандарта [5], при непосредственном методе хранения продолжительность испытаний, то есть фактически время хранения, должна быть не менее срока сохраняемости, который составляет 24 месяца, как это и записано в технических условиях на данные изделия [10].

Для того чтобы не сократить объём выборки, отсчёт времени хранения изделий было принято начинать не с даты закладки первого блока типа Ж (рис. 1), а с даты закладки на хранение

5 блоков типа А (линия *E* на рис. 1). Поэтому время хранения 9 блоков до даты закладки 5 блоков типа А (линия *E* на рис. 1) в дальнейшем не учитывается. Такая процедура контроля технического состояния хранящихся изделий позволяет обеспечить выполнение главного условия выбранных планов испытаний [NUT] и [NUr] – **одновременность** испытаний всех *N* объектов выборки.

В связи с тем, что в данном случае продолжительность хранения всех блоков составила всего 16 месяцев, было принято решение возратить все проверенные изделия на дальнейшее хранение (линия *D* на рис. 1 соответствует дате проведения первых ПСИ всей выборки из 14 блоков; эти испытания проводились для того, чтобы убедиться в исправности отобранных изделий).

В соответствии с рекомендациями стандарта [5] в дальнейшем испытания этих изделий будут проводиться 1 раз в квартал до тех пор, пока срок хранения 5 изделий типа А (заложены на хранение в момент времени *E*) не превысит 24 месяца (линия *K* на рис. 1). Напомним, что продолжительность хранения 24 месяца установлена в технических условиях на рассматриваемые изделия.

Оценка результатов испытаний по табличным данным

Согласно [8], исходными данными при плане испытаний [NUr] служат:

- выборочные значения срока сохраняемости t_1, t_2, t_r ;
- число отказов r ;
- объём выборки N .

По результатам испытаний, проведённых в момент времени *D*, стали известны выборочные значения сроков сохраняемости каждого из 14 изделий ($t_1 = t_2 = \dots = t_N = 16$ месяцев). Для этой даты известны также число отказов ($r = 0$) и объём выборки ($N = 14$).

Как известно, стандарты дают разные рекомендации относительно объёма выборки, отличающиеся в зависимости от вида изделий и отрасли, в

Таблица 1

Информация об изделиях, хранившихся на складе изготовителя на день начала испытаний

Тип изделия	Количество	Срок хранения
А	5	16 месяцев
	3	38 месяцев
Ж	1	44 месяца
	5	32 месяца



Рис. 1. Нормализация продолжительности испытаний на сохраняемость

Таблица 2
Таблица для определения значений параметров оценки гамма-процентного срока сохраняемости (по материалам табл. 26 из [8])

$\gamma/100\%$	q	N		
		$r = 0$	$r = 1$	$r = 2$
0,50	0,80	–	–	–
	0,90	–	–	6
	0,95	–	–	8
	0,99	6	10	10
0,80	0,80	8	8	13
	0,90	10	10	15
	0,95	13	13	20
	0,99	20	20	25
0,90	0,80	15	15	32
	0,90	20	20	32

Таблица 3
Сравнение опытных и табличных значений

Источник	$\gamma, \%$		
	$r = 0$	$r = 1$	$r = 2$
Формула (1)	100,0	92,8	85,7
Табл. 2	80,0	80,0	80,0

которой их используют. Чтобы не увеличивать затраты на экспериментальное определение показателей сохраняемости, стандарт [5] допускает уменьшение количества изделий в выборке, если её объём превышает 1% годового выпуска этих изделий. Так как отобранные для испытаний 14 изделий (объём выборки) существенно меньше 1% их годового выпуска, то сокращать объём выборки не представляется возможным.

При оценке гамма-процентного срока сохраняемости и неизвестном законе распределения значений этого параметра стандарт [8] рекомендует выбирать допустимое число отказов r по табличным данным, предполагая заданным число испытываемых объектов N , что в нашем случае соответствует объёму выборки (табл. 2). На основании данной таблицы можно заключить, что как при отсутствии отказавших блоков ($r = 0$), так и при одном отказавшем блоке ($r = 1$) для выборки объёмом $N = 14 > 13$ гамма-процентный ресурс сохраняемости

характеризуется вероятностью безотказной работы за время ресурса, выраженной в процентах, $\gamma = 80\%$ (напомним, что это соответствует продолжительности испытаний 24 месяца – см. линию K на рис. 1).

Риск потребителя при любом исходе испытаний ($r = 0$ или $r = 1$) составит: $\beta = 1 - q = 1 - 0,95 = 0,05$, где q – доверительная вероятность для γ .

Если же во время хранения произойдёт отказ двух блоков ($r = 2$), то гамма-процентный срок сохраняемости останется неизменным ($\gamma = 80\%$), но согласно табличным данным доверительная вероятность уменьшится до 0,80, а риск потребителя β вырастет до 0,2.

Оценка результатов испытаний по статистическим данным

При наличии отказов, выявленных во время испытаний, стандарт [5] рекомендует использовать для опытного вычисления γ такую формулу:

$$\gamma = \left(1 - \frac{r}{N}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Отметим, что в случае нулевого количества отказов r при любом объёме выборки N результат определения γ по формуле (1) будет один и тот же, то есть $\gamma = 100\%$.

Сравнение результатов, полученных разными способами

Для вынесения окончательной оценки определяемого показателя сохраняемости в табл. 3 сведены:

- результаты вычислений γ по формуле (1) при трёх значениях r для $N = 14$;
- оценки, сделанные на основании табличных данных, приведённых в [8] для $N = 13$.

Отметим, что увеличение количества хранящихся изделий до 15 ($N = 15$) повысит табличное значение γ до 90% (при доверительной вероятности $q = 0,8$), если за время хранения произойдёт отказ не более одного изделия. Расчётное значение этой же величины, найденное по формуле (1), при $r = 1$ и $N = 15$ будет $\gamma = 93,3\%$.

Таблица 4

Сроки ввода в эксплуатацию изделий

Тип изделия	Количество изделий с определённым сроком ввода в эксплуатацию										Среднее значение срока ввода
	Срок ввода в эксплуатацию, месяцев										
	1	3	4	5	6	7	9	12	13	14	
Б	5	6	17	5	3	4	1	–	1	1	4,4 месяца
Д	–	–	12	13	10	–	–	1	2	–	5,6 месяца

Проведённая оценка позволяет утверждать, что гамма-процентный ресурс сохраняемости для выборки из 14 изделий, в которой был зафиксирован один отказ, характеризуется вероятностью γ , значение которой находится в диапазоне $80,0\% < \gamma < 92,8\%$.

Дополнительная оценка гамма-процентного срока сохраняемости

Отбор объектов для испытаний

Для дополнительной оценки гамма-процентного срока сохраняемости были сформированы ещё две выборки.

Вторая (по сквозной нумерации) выборка была составлена из изделий, хранившихся на складе потребителя. Для составления этой выборки был проанализирован весь массив уведомлений о вводе в эксплуатацию (вкладыш в паспорт изделия, при получении которого изготовитель устанавливает увеличенный гарантийный срок), поступивших изготовителю в 2011–2012 годах. Срок хранения изделий у потребителя определялся как разность между датой отгрузки и датой ввода в эксплуатацию. Для испытаний отбирались блоки, поступившие на один и тот же объект и хранившиеся в одинаковых условиях.

Информация о среднем сроке ввода в эксплуатацию для наибольшей по количеству изделий выборки, состоящей из 81 изделия, поставленных на один и тот же объект, сведена в табл. 4.

Отметим, что 74% поставленных изделий (заштрихованные ячейки в табл. 4) были введены в эксплуатацию в срок от 4 до 6 месяцев после отгрузки их потребителю (рис. 2).

Данное исследование подтвердило:

- наличие тенденции сокращения срока ввода в эксплуатацию изделий;
- невозможность использования выборки из 81 изделия для испытаний на сохраняемость из-за относительно небольшого срока их хранения у потребителя.

Проведённые ранее исследования [9] показали, что средний срок ввода изделий в эксплуатацию составлял в среднем (для разных типов и исполнений блока) не более 10 месяцев со дня отгрузки, что также не позволяет использовать эти изделия для оценки показателей сохраняемости.

Тем не менее анализ всего массива уведомлений о вводе в эксплуата-

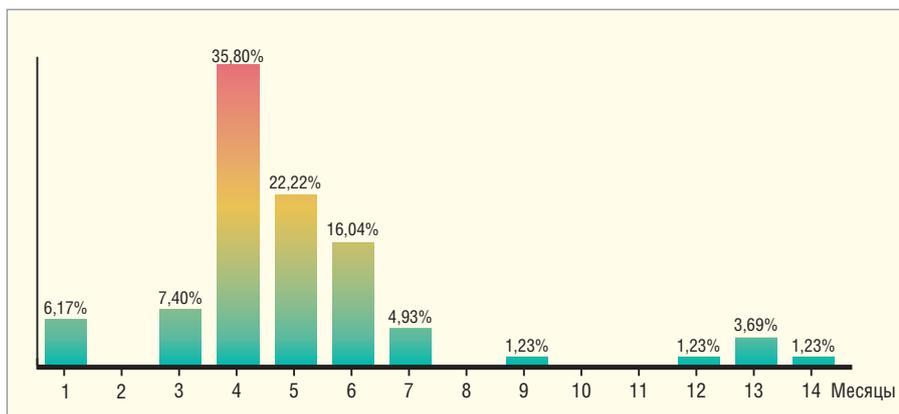


Рис. 2. Диаграмма распределения продолжительности сроков ввода изделий в эксплуатацию

цию, полученных изготовителями в 2011–2012 годах, позволил выявить 15 блоков типа А, поставленных потребителю в 2006, 2007 и 2008 годах тремя партиями на один и тот же объект и хранившихся до момента их ввода в эксплуатацию не менее 24 месяцев:

- 12 блоков поставки 2006 года (от отгрузки 17.11.2006 г. до ввода в эксплуатацию прошло 66 месяцев);
- 1 блок поставки 2007 года (от отгрузки 04.10.2007 г. до ввода в эксплуатацию прошло 56 месяцев);
- 2 блока поставки 2008 года (от отгрузки 25.03.2008 г. до ввода в эксплуатацию прошло 50 месяцев).

Эти блоки хранились на складе потребителя в течение срока, превышающего 24 месяца. Условия хранения соответствовали заданным в документации на них. Всё это позволяет использовать эти 15 изделий для проведения контрольных испытаний на сохраняемость. Таким образом, объём второй выборки для дополнительных испытаний $N_2 = 15$, и составлена эта выборка из изделий, возвращённых изготовителю после хранения у потребителя. Эти изделия не были введены в эксплуатацию после хранения у потребителя из-за замечаний к ним, однако все замечания

потребителя касались только их внешнего вида, что не влияло на электрические характеристики изделий. Причина возврата была признана необоснованной, и в соответствии с рекомендациями, изложенными в п. 2.2.3 стандарта ГОСТ 21493-76, все возвращённые изделия были допущены к контрольным испытаниям на сохраняемость.

Третью выборку составили девять изделий типа К, которые до возвращения изготовителю хранились на складе потребителя в течение 17 месяцев.

Нормализация времени испытаний выборки

При определении срока хранения изделий для второй выборки в качестве определяющего был выбран наименьший срок хранения – 50 месяцев и из него исключена продолжительность логистической задержки [2], составляющей 2 месяца. Отметим, что стандарт [5] допускает длительность такой задержки до 3 месяцев.

Таким образом, срок хранения выборки из 15 блоков составил 48 месяцев, что соответствует удвоенному сроку сохраняемости, зафиксированному в технических условиях [10].

Таблица 5

Таблица для определения значений параметров оценки среднего срока сохраняемости (по материалам табл. 28 из [8])

<i>d</i>	<i>q</i>	<i>N</i>				
		<i>P(t)=0,800</i>	<i>P(t)=0,850</i>	<i>P(t)=0,900</i>	<i>P(t)=0,950</i>	<i>P(t)=0,975</i>
0	0,80	7	10	15	31	64
	0,90	10	14	22	45	91
	0,95	13	18	28	58	118
	0,99	21	28	44	90	182
1	0,80	14	19	29	59	119

Приёмо-сдаточные испытания 15 блоков типа А после снятия их с хранения проводились в условиях эксплуатирующего предприятия с участием специалистов изготовителя.

Оценка результатов испытаний по табличным данным

В результате испытаний установлено, что все контролируемые параметры и характеристики изделий, составивших вторую выборку, соответствуют требованиям технических условий на изделия типа А, а количество отказавших изделий равно нулю, то есть $r = 0$.

Значение γ на основании табличных данных для этих 15 блоков равно 90% при доверительной вероятности $q = 0,8$, как при $r = 0$, так и при $r = 1$.

Испытания третьей выборки, состоящей из изделий, возвращённых изготовителю, подтвердили их соответствие требованиям технических условий без учёта замечаний по внешнему виду. Используя данные из табл. 2, принимаем для девяти изделий типа К значение γ равным 80% при доверительной вероятности $q = 0,8$ и $r = 0$.

Таким образом, контрольные испытания трёх выборок блоков позволили одинаково оценить нижнюю границу γ .

Оценка среднего срока сохраняемости

Оценку среднего срока сохраняемости $T_{с. ср}$ произведём на примере двух выборок.

Первая выборка состоит из 14 изделий типов А и Ж. После хранения этих 14 изделий в течение 16 месяцев (линии Е и Д на рис. 1) ни одного отказа не произошло и все изделия сохранили работоспособность.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в [8] для плана испытаний [NUT], при оценке среднего срока сохраняемости необходима такая исходная информация:

- выборочные значения срока сохраняемости t_1, t_2, t_d (d – допустимое число отказов);
- продолжительность испытаний T ;
- объём выборки N .

Выборочные значения срока сохраняемости для всех испытываемых изделий одинаковы ($t_1 = t_2 = \dots = t_N = 16$ месяцев). Продолжительность испытаний $T = 16$ месяцев, а объём выборки $N = N_1 = 14$.

Воспользуемся табл. 5, составленной по материалам таблицы 28 из руководящих документов [8], для определения значений параметров оценки среднего

срока сохраняемости при известном значении N (заштрихованная ячейка).

В связи с ограниченностью размеров выборки проверяемых блоков в

нашем случае при оценке среднего срока сохраняемости $T_{с. ср}$ используем нижнюю доверительную границу вероятности безотказной работы $P(t)$. При объёме выборки $N_1 = 14$, $q = 0,9$ и $d = 0$ принимаем значение $P(t) = 0,85$ (заштрихованная ячейка в табл. 5).

Так как выборка из 14 изделий хранилась 16 месяцев (табл. 1), то суммарный срок хранения этих изделий составил:

$$T_{\Sigma 1} = 16 \times 14 = 224 \text{ месяца (более 150 000 часов).}$$

Отметим, что в технических условиях [10] средняя наработка на отказ этих изделий составляет 125 000 часов.

На дату проведения испытаний (линия D на рис. 1) подтверждённое предыдущими испытаниями значение среднего срока сохраняемости $T_{с. ср}$ составило 16 месяцев.

Если за оставшееся до даты окончания испытаний на сохраняемость время (линия K на рис. 1) не будет зафиксировано ни одного отказа ($d = 0$), то средний срок сохраняемости $T_{с. ср} = 24$ месяца при $P(t) = 0,85$.

Если же за этот период времени произойдёт отказ одного изделия ($d = 1$), то значение среднего срока сохраняемости $T_{с. ср}$ останется прежним, но изменится значение q (уменьшится до 0,8), а $P(t)$ станет равным 0,80.

Изделия из второй выборки ($N_2 = 15$) хранились у потребителя 48 месяцев. При проверке после хранения отказов изделий не было зафиксировано. Поэтому средний срок сохраняемости изделий из этой выборки $T_{с. ср} = 48$ месяцев при $q = 0,8$, $d = 0$ и $P(t) = 0,9$ (табл. 5).

Суммарный срок хранения этой выборки составил $T_{\Sigma 2} = 15 \times 48 = 720$ месяцев, или более 500 000 часов, что более чем в три раза превышает значение наработки на отказ, установленное в технических условиях [10].

Выводы

1. Предложен подход к оценке показателей сохраняемости, позволяющий использовать стандартные планы испытаний, оценить риск потребителя и поставщика, доверительную вероятность, объём выборки и другие показатели по таблицам, приведённым в нормативных документах.
2. Данный подход был реализован применительно к нескольким выборкам изделий, хранившихся у изгото-

вля и потребителя, и позволил оценить основные показатели сохраняемости этих изделий.

3. Проведённые испытания на сохраняемость подтвердили значения показателей сохраняемости изделий, зафиксированных в технических условиях на них, доказав тем самым корректность предложенного подхода. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. – М.: ОРГРЭС, 1997.
2. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
3. ДИВГ.648228.001 ТУ. Блоки микропроцессорные релейной защиты БМРЗ: технические условия. – СПб.: Механотроника, 1996.
4. ГОСТ 23216-78. Изделия электротехнические. Хранение, транспортирование, временная противокоррозионная защита, упаковка. Общие требования и методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
5. ГОСТ 21493-76. Изделия электронной техники. Требования по сохраняемости и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1994.
6. ГОСТ 2583-92. Батареи из цилиндрических марганцево-цинковых элементов с соевым электролитом. – М.: Издательство стандартов, 1992.
7. РД 50-707-91. Методические указания. Изделия медицинской техники. Требования к надёжности. Правила и методы контроля показателей надёжности. – М.: Издательство стандартов, 1992.
8. РД 50-690-89. Методические указания. Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным. – М.: Издательство стандартов, 1990.
9. Гондуров С.А., Захаров О.Г. Определение наработки на отказ по результатам эксплуатации [Электронный ресурс] // Всё о релейной защите. – 2009. – Режим доступа: http://rza.org.ua/article/read/Opredelenie-narabotki-na-otkaz-po-rezul-tatam-ekspluatatsii-Gondurov-S-A---Zaharov-O-G-_77.html.
10. СТО ДИВГ-050-2012. Блоки микропроцессорные релейной защиты БМРЗ: технические условия. – СПб.: Механотроника, 2012.

E-mail: olgezaharov.@yandex.ru