

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

АНДРЕЕВ Д.А., канд. техн. наук, НАЗАРЫЧЕВ И.А., студ.

Выполнен анализ методов определения состояния высоковольтных выключателей, основанный на оценке расхода коммутационного ресурса с учетом эксплуатационных факторов. Выбран метод расчета значений сработанного и остаточного ресурса высоковольтных выключателей, позволяющий перейти к системе технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, высоковольтные выключатели, коммутационный ресурс, экспертная система.

ANALYZING METHODS OF ESTIMATING COMMUTATION LIFE OF HIGH-VOLTAGE SWITCHES

D.A. ANDREEV, Candidate of Engineering, I.A. NAZARYCHEV, Student

The authors analyze methods of defining high-voltage switches condition based on the estimation of commutation life expectancy depending on operational factors. The authors determine a method of calculating used and residual resource which allows using the maintenance and repair system according to the technical condition.

Key words: electrical equipment, high-voltage switches, commutation life, expert system.

Эффективность функционирования электро-технического оборудования (ЭО) электростанций, подстанций, электрических сетей и систем электроснабжения связана с его техническим состоянием. Надежность ЭО зависит не только от качества его изготовления, но и от применения научно обоснованной системы технического обслуживания и ремонта (ТОР). В настоящее время, согласно требованиям нормативно-технической документации, применяется система планово-предупредительных ремонтов (ППР), где основным технико-экономическим критерием является минимум простоев оборудования на основе жесткой регламентации ремонтных циклов.

Однако система ППР в условиях развития рыночных отношений в области энергоремонта во многих случаях не обеспечивает принятие оптимальных решений. Это связано с тем, что назначение профилактических работ осуществляется регламентно и не зависит от фактического технического состояния ЭО, что приводит к появлению дополнительных материальных и трудовых затрат. Новым направлением в развитии системы ТОР является разработка методов, основанных на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации.

Новое ЭО, устанавливаемое на энергетических объектах, имеет высокую безотказность и долговечность, однако со временем происходит ухудшение его эксплуатационных характеристик, уменьшается его надежность. Высоковольтные выключатели являются одним из основных типов ЭО, применяемого в распределительных устройствах станций и подстанций. Поэтому их надежность и долговечность может сильно сказаться на устойчивости работы электроэнергетической системы в целом. В современных условиях, когда износ основных производственных фондов электроэнергетической отрасли превышает 50 %, проблема обеспечения безотказной работы высоковольтных выключателей является особенно актуальной.

В связи с этим необходимо разрабатывать средства получения диагностической информации, а также математические методы и модели, позволяющие учесть все факторы, влияющие на техни-

ческое состояние выключателей. Еще более важной задачей является создание комплексного метода определения технического состояния, способного объединить разностороннюю диагностическую информацию и на этой базе рассчитать интегральную количественную характеристику уровня технического состояния – сработанный ресурс. Сравнивая полученное значение с допустимыми границами его изменения, можно сформулировать рекомендации о необходимости вывода выключателя в ремонт или о продолжении его эксплуатации. Кроме того, комплексный метод определения технического состояния высоковольтных выключателей должен позволять прогнозировать остаточный ресурс коммутационного аппарата.

В настоящее время некоторые специалисты [2] считают, что определить остаточный ресурс какого-либо оборудования на сегодняшний день принципиально невозможно, что связано, в первую очередь, с отсутствием факторов, монотонно изменяющихся с течением времени в процессе эксплуатации. Другие же исследователи [3–12] доказывают обратное. Ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние, а наработка – продолжительность или объем работы объекта [3]. Величина наработки, а значит и ресурса, для различного ЭО измеряется в единицах наработки, например, часах, количествах коммутаций, количествах пусков и т.д. Единицы измерения обычно выбираются в соответствии с назначением ЭО и особенностями его работы. В литературе часто применяют временные единицы измерения ресурса. Однако это не всегда удобно, особенно для ЭО, срок службы которого зависит в основном не от количества часов, которое оно находилось под напряжением, а от количества выполненных им операций. Для выключателей часто применяют в качестве единиц наработки количество коммутаций.

Существующие методы контроля сработанного и остаточного ресурса высоковольтных выключателей можно разделить на две группы:

1. *Оценка сработанного и остаточного ресурса на основе данных, предоставляемых заводом-изготовителем.* Подавляющее большинство заводов-изготовителей предоставляет данные по

начальному ресурсу выключателей, а также данные, необходимые для оценки сработавшего и остаточного ресурса при условии работы выключателя в номинальных (расчетных) условиях работы. Эти данные предоставляются как по коммутационному, так и по механическому ресурсу.

2. *Оценка сработавшего и остаточного ресурса на основе методов и средств технической диагностики*, т.е. на основе реального состояния коммутационных аппаратов по данным инструментального контроля.

Как коммутационный, так и механический ресурс подразделяются на начальный, сработанный и остаточный [4]. Данные поначальному ресурсу отражены в специализированной нормативно-технической документации, а также в инструкциях, поставляемых с конкретным выключателем. Начальный ресурс можно представить как располагаемый «запас прочности», который имеет конкретный выключатель на начальный момент работы. Сработанный ресурс отражает степень износа деталей и узлов конкретной единицы оборудования. При этом под сработанным коммутационным ресурсом для выключателя понимают степень износа дугогасительной камеры, а механический ресурс характеризуется числом циклов включения – производная пауза – отключение, выполняемых без тока в главной цепи выключателя [4]. Под остаточным ресурсом понимают остаток ресурса выключателя после определенного периода эксплуатации и числа операций по отключению и включению нагрузочных токов и токов КЗ [4]. На практике необходимо знать вероятность отказа выключателя при отключении (включении) им тока, т.е. произведет выключатель операцию отключения (включения) или откажет. Под остаточным ресурсом, определяющим вывод выключателя в ремонт, следует понимать такой уровень технического состояния выключателя, при котором при отключении им номинального тока отключения его располагаемый ресурс примет отрицательное значение. В условиях эксплуатации очень важно знать величину располагаемого ресурса, так как данный параметр отражает реальное состояние выключателя и позволяет произвести коррекцию межремонтных периодов с учетом обеспечения безотказности работы.

Существует несколько подходов по определению остаточного коммутационного ресурса выключателей [6, 4, 7, 5, 8, 9]. Механический ресурс выключателя обычно задается в паспортных данных. Так как его величина характеризует работу выключателя без токовой нагрузки, то обычно нет необходимости рассчитывать и прогнозировать его значение, за тем лишь исключением, когда необходимо учитывать какие-либо специфические особенности эксплуатации. Поэтому в существующих подходах обычно рассматривается лишь коммутационный ресурс. При этом расчеты выполняются либо по данным реальных значений коммутируемых токов, либо по их вероятным значениям. Практически в каждом из рассматриваемых далее методов (кроме методов, приведенных в [10], [11]) расчет ресурса ведется на полюс выключателя.

Для идентификации методов и удобства их дальнейшего анализа составим поясняющую таблицу (табл. 1).

Таблица 1. Методы определения ресурса высоковольтных выключателей

Идентификатор	Источники	Ссылка на литературу
Метод 1	ГОСТ 687-78	[9]
Метод 2	ОРГРЭС	[8]
Метод 3	Разработки Б.Н. Неклепаева и А.А. Востросаблина	[4, 6, 7]
Метод 4	Автоматизированные экспертные системы на примере системы «НИКТА»	[12]
Метод 5	Разработки В.Е. Пильщикова	[10]
Метод 6	Принцип Сидякина	[11]

Метод 1. По этому методу сработанный ресурс рассчитывается по известным значениям отключаемых токов путем округления их значений в заданных пределах отключаемых токов (30–60 %, 60–100 % и т.д. от номинального тока отключения выключателя). В первоначальном виде этот метод [9] давал требования к суммарному числу отключений и включений токов КЗ. При этом допустимое число отключений должно было составлять не менее 2/3 суммарного числа коммутаций. В настоящее время после внесения в стандарт изменений нормируется только допустимое число отключений, что соответствует международной практике и стандартам МЭК. Для большинства выключателей, у которых функции включения и отключения осуществляются одной и той же контактной системой, износ дугогасительного устройства при включении существенно меньше, чем при отключении, и им можно пренебречь при нормальных условиях работы выключателей. Для некоторых типов выключателей, например воздушных серии ВВН и ВВБ, у которых функции включения и отключения выполняют разные контактные системы, целесообразно допустимое число включений указывать в технической документации дополнительно к допустимому числу отключений. Однако кривые зависимости допустимого количества отключений и включений лежат рядом, поэтому имеет смысл заменить их одной универсальной кривой. При этом стоит отметить, что для некоторых типов выключателей, в связи с их специфическими особенностями, такое усреднение проводить не следует.

Расход коммутационного ресурса выключателя за все операции по отключению тока I определяется согласно следующему выражению:

$$r_i = \frac{N_{\text{факт.}i}}{N_{\text{доп.}i}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{доп.}i}$ – допустимое число отключений тока определенной величины I (определяется согласно данным инструкций завода-изготовителя), $N_{\text{факт.}i}$ – число отключений выключателем тока I .

Расход коммутационного ресурса выключателя за все операции определяется как

$$R_{\text{сраб}} = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{факт.}i}}{N_{\text{доп.}i}}, \quad (2)$$

где n – число различных значений отключаемых токов.

Остаточный коммутационный ресурс выключателя определяется следующим образом:

$$R_{\text{ост}} = 1 - R_{\text{сраб}}. \quad (3)$$

В случае контроля оперативным персоналом сработавшего и остаточного коммутационного ре-

сурса могут быть уточнены сроки вывода выключателя в средний или капитальный ремонт. При этом условием, отражающим необходимость ближайшего вывода выключателя в ремонт, является возможность полной сработки коммутационного ресурса выключателя при очередном отключении (включении) им номинального тока отключения.

Рассмотрим применение этого метода на примере масляного бакового выключателя типа У-110. Данные выключатели морально и физически устарели, однако до сих пор используются на энергообъектах. Поэтому очень важно контролировать уровень их фактического технического состояния до тех пор, пока они не будут заменены на современные выключатели.

В инструкции по эксплуатации выключателя У-110-2000-40 приведены следующие данные по количеству допустимых коммутаций на известных интервалах токов (табл. 2).

Таблица 2. Паспортные данные по допустимому количеству коммутаций для выключателя типа У-110-2000-40

Коммутируемый ток I	Допустимое количество коммутаций $N_{доп}$
$I < 30\% I_{о,ном}$	16
$30\% I_{о,ном} < I < 60\% I_{о,ном}$	12
$60\% I_{о,ном} < I < 100\% I_{о,ном}$	10
$I = I_{ном}$	150

Примечание: $I_{о,ном}$ – номинальный ток отключения, в данном случае 40 кА; $I_{ном}$ – номинальный ток, в данном случае 2000 А.

На основании данных табл. 2 построим график зависимости допустимого количества коммутаций от величины коммутируемого тока (рис. 1).

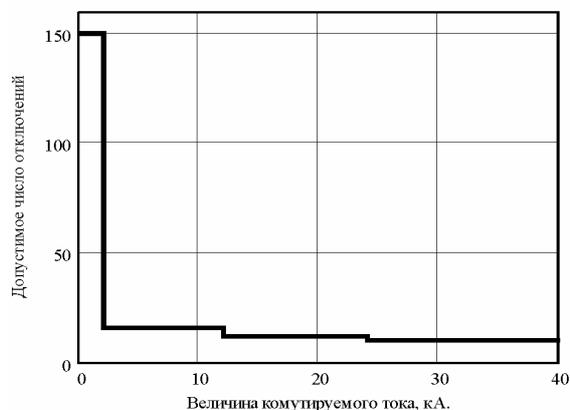


Рис. 1. Зависимость допустимого количества коммутаций от коммутируемого тока, построенная непосредственно по паспортным данным для выключателя типа У-110-2000-40 согласно требованиям построения метода 1

Допустим, что совершенное количество коммутаций и соответствующее значение коммутируемого тока известно и соответствует приведенным в табл. 3 значениям.

Таблица 3. Распределение количества совершенных коммутаций по интервалам коммутируемого тока

Режим	Значения коммутируемых токов, кА.								
	2	5	10	14	22	27	30	35	40
1	-	2	2	2	2	2	-	-	2
2	-	-	4	-	4	-	-	-	4
3	-	4	-	4	-	4	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	10

Воспользовавшись выражениями (2) и (3), легко подсчитать сработанный и остаточный коммутационный ресурс. Значения, полученные в результате расчета для каждого из режимов, сведены в табл. 4.

Из табл. 3, 4 видно, что в первых трех режимах выключатель коммутировал различные по величине токи разное количество раз.

Таблица 4. Расчетные значения сработанного и остаточного коммутационного ресурса выключателя У-110-2000-40, полученные методом 1

Режим	$R_{ср}$	$R_{ост}$
1	0,983	0,017
2	0,983	0,017
3	0,983	0,017
4	1	0

Однако при этом во всех трех случаях (табл. 4) как остаточный, так и сработанный коммутационный ресурс получился одинаковым. Полученные результаты представляются маловероятными, что говорит о низкой точности и достоверности этого метода. При этом следует отметить простоту выполнения расчетов и легкость процедуры автоматизации применения данного метода, причем последнее замечание не является актуальным в связи с широким развитием вычислительной техники на сегодняшний день.

Таким образом, данный метод позволяет получить численные значения ресурса. Однако эти результаты имеют низкую достоверность и могут служить лишь для приближенной оценки состояния выключателя, а значит, на основании данного метода нецелесообразно планировать их ТОР.

Метод 2. Настоящий метод [8] позволяет унифицировать методы определения расхода коммутационного ресурса и допустимого количества отключений токов, после которого выключатель должен быть выведен в ремонт. Расход коммутационного ресурса и количество коммутаций до вывода выключателя в ремонт определяются по кривым зависимости допустимого количества отключений (включений) от тока, которые строятся на основании данных предприятий-изготовителей.

Кривые зависимости допустимого количества отключений (включений) от тока строятся на основании данных предприятий-изготовителей, приводимых в инструкциях по эксплуатации. По согласованию с НИЦ ВВА, могут использоваться результаты специально проведенных исследований и материалы, опубликованные в технической литературе или приводимые в протоколах испытаний.

Данные по коммутационному ресурсу выключателей могут быть заданы в инструкциях по эксплуатации различными способами. Способ задания коммутационного ресурса определяет метод построения кривых зависимости допустимого количества отключений (включений) от тока. В [8] рассматриваются следующие методы построения кривых:

1. Коммутационный ресурс задан в виде кривых зависимости допустимого числа отключений от тока.

2. Коммутационный ресурс задан в виде кривых зависимостей допустимого суммарного количества отключений и включений от тока.

3. Коммутационный ресурс задан в виде одного, двух или трех значений допустимого количества отключений, отнесенных к конкретным зна-

чениям тока, например к номинальному току отключения ($I_{O,НОМ}$), токам $0,6I_{O,НОМ}$ и $0,3I_{O,НОМ}$.

4. Коммутационный ресурс задан в виде одного, двух или трех значений допустимого суммарного количества отключений и включений, отнесенных к конкретным значениям тока.

5. Коммутационный ресурс задан в виде одного, двух или трех значений допустимого количества отключений, отнесенных к интервалам значений отключаемого тока, например от $0,6I_{O,НОМ}$ до $I_{O,НОМ}$, от $0,3I_{O,НОМ}$ до $0,6I_{O,НОМ}$, от $0,1I_{O,НОМ}$ до $0,3I_{O,НОМ}$.

6. Коммутационный ресурс задан в виде одного, двух или трех значений допустимого суммарного количества отключений и включений, отнесенных к интервалам значений отключаемого тока.

Основным отличием данного метода от описанного выше является то, что известные значения отключаемых токов не округляются в заданных интервалах. Вместо этого строится монотонная зависимость одним из способов, приведенных выше.

Расход коммутационного ресурса за одно отключение тока I равен величине, обратной допустимому количеству отключений при данном токе:

$$\rho_{OI} = \frac{1}{n_{OI}} \quad (4)$$

Расход коммутационного ресурса после нескольких отключений (включений) определяется путем суммирования расходов ресурса за каждую операцию отключения (включения). Расход коммутационного ресурса за K отключений определяется как

$$R_{OK} = \sum \rho_{OI} = \sum \frac{1}{n_{OI}} \quad (5)$$

Расход коммутационного ресурса определяется для каждого полюса выключателя, необходимость вывода выключателя в ремонт – по полюсу с наибольшим расходом ресурса.

Выключатель (полюс выключателя) должен быть выведен в ремонт, если при следующем отключении полюсом выключателя тока КЗ расход его коммутационного ресурса может превысить единицу. Таким образом, условие вывода выключателя в ремонт имеет вид

$$\sum \frac{1}{n_{OI}} > 1 - \frac{1}{n_{0,min}} \quad (6)$$

где $n_{0,min}$ – допустимое количество отключений при наибольшем токе, возможном в месте установки выключателя.

Для выключателей серии ВВБ предприятие-изготовитель в качестве критерия необходимости вывода в ремонт вместо (7) принимает выражение

$$\sum \frac{1}{n_{OI}} \geq 1, \quad (7)$$

т.е. считается возможным срабатывание коммутационного ресурса до значений, превышающих единицу на величину вплоть до $1/n_{0,min}$. Это связано с наличием запасов по коммутационной износостойкости. Выражением (7) можно пользоваться только для выключателей серии ВВБ, а для других выключателей – только при согласии предприятия-изготовителя.

При ограничениях предприятиями-изготовителями выключателей количества включений на токи КЗ расход коммутационного ресурса следует опре-

делять как по отключениям, так и по включениям. Метод определения расхода коммутационного ресурса при включении и критерий вывода выключателя в ремонт аналогичны указанным выше для операций отключения.

Расход ресурса при включении:

$$\rho_{el} = \frac{1}{n_{el}} \quad (8)$$

Наработка ресурса:

$$R_{вК} = \sum \frac{1}{n_{el}} \quad (9)$$

Критерий вывода в ремонт:

$$\sum \frac{1}{n_{el}} > 1 - \frac{1}{n_{e,min}} \quad (10)$$

Ресурс считается исчерпанным, если удовлетворяется любое неравенство (6) или (10).

В [8] также рассматривается возможность прогнозирования допустимого количества отключений и включений тока. Методы прогнозирования количества отключений (включений) применяются для выключателей, установленных на линиях электропередачи, при отсутствии возможности регистрации токов КЗ. При этом расчет допустимого количества отключений (включений) производится по известным расчетным значениям токов КЗ в начале и в конце линии с определенной доверительной вероятностью в предположении постоянной плотности распределения вероятности возникновения токов КЗ вдоль защищаемой выключателем линии.

В качестве примера рассмотрим тот же самый пример, который приводился для метода 1. Построим кривую по данным табл. 2 (рис. 2).

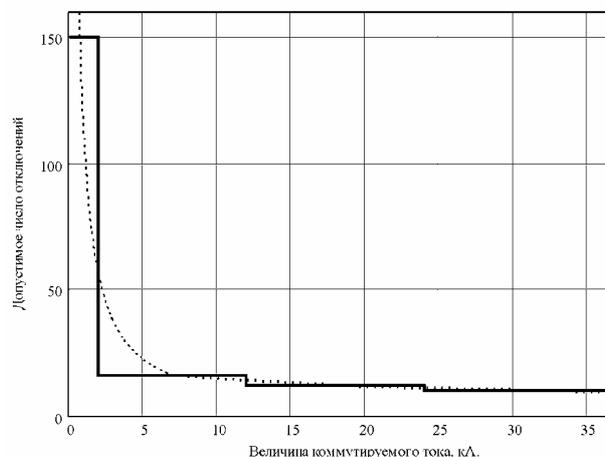


Рис. 2. Зависимость допустимого количества коммутаций от коммутируемого тока, построенная непосредственно по паспортным данным для выключателя типа У-110-2000-40 согласно требованиям построения метода 2: — – кривая по методу 1; – кривая по методу 2

Зависимость для метода 2 строилась согласно указаниям, имеющимся в [8]:

- кривая проводилась через середины интервалов;
- при значении тока, равном $I_{O,НОМ}$, допустимое количество отключений не должно быть менее четырех;
- при токах, значения которых меньше, чем середина интервала с наименьшими значениями тока,

кривая проводилась в предположении о сохранении постоянным значения суммарного тока отключения.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 3. Расчет сработанного коммутационного ресурса проводится по формулам (5) и (9), а остаточного – по формуле (3). Стоит отметить, что в [8] не встречается формула (3), однако возможность ее применения в этом методе очевидна, так как в нем упоминается начальное значение ресурса. Соответственно, если выключатель сработал некоторую часть своего ресурса, то его остаток является начальным значением на момент расчета. Кроме того, эта величина необходима для сравнения применяемых методов.

Значения, полученные в результате расчета для каждого из режимов, сведены в табл. 5.

Таблица 5. Расчетные значения сработанного и остаточного коммутационного ресурса выключателя У-110-2000-40, полученные методом 2

Режим	$R_{ср.аб.}$, о.е.	$R_{ост.}$, о.е.
1	0,981	0,019
2	1,094	-0,094
3	0,867	0,133
4	1,111	-0,111

Отрицательные значения остаточного коммутационного ресурса выключателя свидетельствуют о полной сработке располагаемого коммутационного ресурса. Данный метод, по сравнению с *методом 1*, дает более точные результаты. Однако в связи с заменой паспортных данных и, соответственно, ступенчатой кривой на гладкую зависимость, мы производим некоторую интерполяцию нормативных данных, которая вносит погрешность, особенно при значениях коммутируемых токов, близких к границам рабочего интервала выключателя. С другой стороны, сглаживание позволяет получить хоть какую-то информацию о сработке ресурса в диапазоне, чуть превышающем установленный паспортными данными на выключатель. Кроме того, стоит отметить сложность применения данного метода на ЭВМ, так как при вводе нормативной кривой в ЭВМ необходимо разбить построенную гладкую нормативную кривую на участки, что вызывает появление погрешности, которая будет тем меньше, чем на большее количество участков будет разбита кривая. При современном уровне развития вычислительной техники это не представляет труда.

К достоинствам этого метода стоит также отнести разработанные критерии вывода в ремонт выключателя по техническому состоянию, а также возможность прогнозирования ресурса на основе вероятностных данных о величинах токов короткого замыкания. К сожалению, данный метод не учитывает тот факт, что ресурс выключателя после капитального ремонта не восстанавливается до исходного значения и с продолжением эксплуатации выключателя постепенно уменьшается.

Метод 3. В работах [4, 6, 7] предприняты попытки поиска аналитической зависимости, которая наиболее достоверно отражает ступенчатую (ломаную) зависимость, построенную по данным из нормативно-технической документации для конкретного типа выключателя. Исследования с помощью метода наименьших квадратов показали, что зависимости допустимого числа коммутаций от коммутируемого тока с наилучшим приближением описываются гиперболической зависимостью вида

$$n = A + \frac{B}{I_{откл}^*}, \quad (11)$$

где n – гарантированное для выключателя число коммутаций токов КЗ, A и B – численные коэффициенты, $I_{откл}^* = I_{откл} / I_{откл.ном}$ – гарантированный ток отключения (в долях номинального тока отключения выключателя $I_{откл.ном}$).

Зависимость (11) применима и для других типов выключателей при определении для них соответствующих коэффициентов, а в случае невозможности нахождения этих коэффициентов мы предлагаем воспользоваться выражением

$$\frac{I_{откл}}{I_{откл.ном}} n = I_{откл}^* n = K, \quad (12)$$

где K предлагается принять равным 10.

В работах [4, 6, 7] поиск аналитической зависимости вида (11) выполнялся на примере выключателя ВМТ-110-25/1250, для которого приближенной к данным нормативно-технической документации оказалась кривая вида (11). Нами получены значения коэффициентов A и B для рассматриваемого выключателя, а также для выключателей некоторых других типов. С использованием зависимости (11) считается возможным произвести расчет коммутационного ресурса выключателя, как сработанного (см. формулу (13)), так и остаточного (см. формулу (14)):

$$R_{ср.аб.} = \sum_{i=1}^{N_K} \frac{I_{откл.i}^* N_{K,i}}{A I_{откл.i}^* + B}; \quad (13)$$

$$R_{ост.} = 1 - R_{ср.аб.} = 1 - \sum_{i=1}^{N_K} \frac{I_{откл.i}^* N_{K,i}}{A I_{откл.i}^* + B}, \quad (14)$$

где $R_{ср.аб.}$, $R_{ост.}$ – сработанный и остаточный ресурс выключателя соответственно; N_K – общее количество отключенных КЗ; $N_{K,i}$ – число отключенных КЗ с током $I_{откл.i}^*$; A , B – коэффициенты, зависящие от типа выключателя.

Выполним проверку предположения [4, 6, 7] о возможности применения зависимости (11) к другим типам выключателей, например для выключателя У-110-2000-40. Отметим, что авторы *метода 3* применили зависимость (11) для выключателя типа ВМТ-110-25/1250. Для этого преобразуем выражение (11), умножив обе части на $I_{откл}^*$:

$$S = n I_{откл}^* = A I_{откл}^* + B, \quad (15)$$

где $S = n I_{откл}^*$, раз.

Умножив обе части уравнения (15) на $I_{о.ном}$, получим выражения для S в раз*кА:

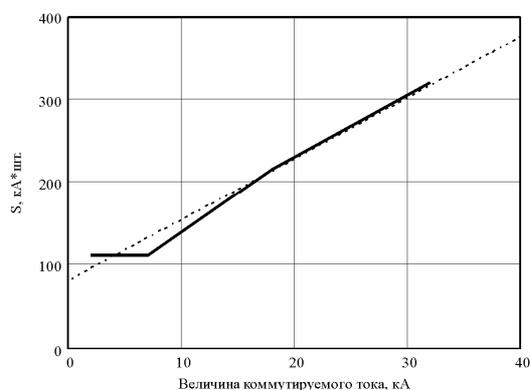
$$S = A I_{откл} + B I_{о.ном}; \quad (16)$$

$$S = A' I_{откл} + B'. \quad (17)$$

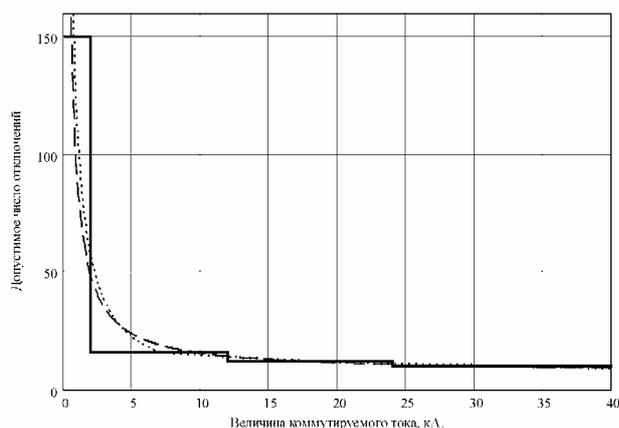
Преобразовав выражение (11) в (15), перешли от гиперболической зависимости к линейной. Построим $S(I_{откл})$ по выражения (17) и ломаную $S(I_{откл})$ по паспортным данным (рис. 3). Данные для построения ломанной $S(I_{откл})$ по паспортным данным приведены в табл. 6. При расчетах в качестве величины коммутируемого тока использовалась середина интервала по току.

Таблица 6. Данные для построения ломанной $S(I_{откл})$ по паспортным данным

$S, \text{кА} \cdot \text{шт.}$	320	216	112	112
$I, \text{кА}$	32	18	7	2

Рис. 3. Зависимость величины S от коммутируемого тока, построенная непосредственно по паспортным данным для выключателя типа У-110-2000-40: — кривая по данным табл. 6; — кривая по выражению (16)

Анализ полученной зависимости (рис. 3) показывает, что применение гиперболической зависимости для описания функции допустимого числа отключений от величины коммутируемого тока возможно. При этом в области токов, близких к номинальным, зависимость дает невысокую точность. Рассмотрим возможность применения *метода 3* для определения ресурса выключателя У-110-2000-40. Для этого из графика (рис. 3) найдем значение параметров A' и B' , которые равны соответственно: $A' = 7,397$ и $B' = 80,893$. Построим кривую по выражению (11) и данным табл. 2 для найденных коэффициентов A' и B' (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость допустимого количества коммутаций от коммутируемого тока, построенная непосредственно по паспортным данным для выключателя типа У-110-2000-40 согласно требованиям построения *метода 3*: — кривая по паспортным данным; — кривая по *методу 2*; - - - - кривая по *методу 3*

Анализ полученной зависимости (рис. 4) показывает, что кривая, построенная по *методу 3*, практически совпадает с кривой, построенной по *методу 2*. Однако, как отмечалось выше, гиперболическая кривая не всегда справедлива в области токов, по величине близких к нагрузочным. *Метод 3* обладает всеми достоинствами и недостатками *метода 2* с

тем лишь исключением, что нормативная кривая уже представлена в виде математического выражения. Поэтому все трудности, связанные с выводом данных в ЭВМ и их обработкой, исчезают. Однако стоит отметить, что расчеты по аналитическому выражению могут внести дополнительную погрешность, связанную с неточностью описания паспортных данных с помощью гиперболической функции, как, например, в случае выключателя У-110-2000-40 в области нагрузочных токов.

Расчеты сработанного и остаточного ресурса для выключателя У-110-2000-40 ведутся по выражениям (13) и (14), соответственно. Значения, полученные в результате расчета для каждого из режимов, сведены в табл. 7.

Таблица 7. Расчетные значения сработанного и остаточного коммутационного ресурса выключателя У-110-2000-40, полученные методом 3

Режим	$R_{ср\text{аб}}$	$R_{ост}$
1	0,951	0,049
2	1,044	0,044
3	0,858	0,142
4	1,062	-0,062

Как и в других случаях, отрицательное значение остаточного ресурса свидетельствует о том, что выключатель выработал свой ресурс и должен быть выведен в капитальный ремонт. Данный метод отличается от *метода 2* фактически лишь тем, что к графической кривой *метода 2* подбирается аналитическая функция, наиболее точно описывающая ее. Несомненно, это является очень важным моментом в определении значений сработанного и остаточного ресурса, так как очень облегчает расчет и автоматизацию данного метода с помощью ЭВМ. К сожалению, в *методе 3* не вводится никакого дополнительного критерия вывода в ремонт выключателя по техническому состоянию, кроме факта полного исчерпания ресурса, в отличие от *метода 2*, где сформулирован четкий критерий необходимости вывода выключателя в ремонт. Кроме того, зависимость (11) не может быть использована для всех выключателей, так как на некоторых интервалах коммутируемого тока ее приближение является достаточно грубым и не точным.

Анализ методов 1, 2 и 3. Проанализируем три рассмотренных выше метода в целях выявления их особенностей, достоинств и недостатков. В первую очередь необходимо отметить, что во всех рассматриваемых методах величины остаточного и сработанного коммутационного ресурса фактически определяются по одним и тем же формулам. Отличия заключаются лишь в способе задания и построения зависимости допустимого числа коммутаций от величины коммутируемого тока. Из этого следует, что если считать величину коммутируемого тока эксплуатационным фактором, воздействию которого подвергается выключатель в процессе эксплуатации, то все эти методы учитывают всего лишь один этот фактор.

Для дальнейшего анализа сведем результаты расчета ресурса для выключателя У-110-2000-40 в одну таблицу (табл. 8), используя данные табл. 4, 5, 7. Все расчеты по каждому из рассматриваемых методов проводились по одному и тому же выключателю, работающему в одних и тех же условиях.

Таблица 8. Расчетные значения сработанного и остаточного коммутационного ресурса выключателя У-110-2000-40, полученные методами 1, 2 и 3

Ре- жим	$R_{ср\text{аб}}$			$R_{ост}$		
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 1	Метод 2	Метод 3
1	0,983	0,981	0,951	0,017	0,019	0,049
2	0,983	1,094	1,044	0,017	-0,094	0,044
3	0,983	0,867	0,858	0,017	0,133	0,142
4	1	1,111	1,062	0	-0,111	-0,062

Количество коммутаций и величины коммутируемых токов для всех методов были приняты одни и те же, согласно табл. 3. Нормативные кривые во всех методах строились на основании одних и тех же исходных данных, приведенных в табл. 2. Несмотря на это, значения сработанного и остаточного коммутационного ресурса по каждому из методов получились различные. Согласно данным табл. 3, в каждом из четырех заданных режимах работы выключателя он коммутировал различные по величине токи неодинаковое число раз. Однако значения сработанного и остаточного ресурса, полученные по методу 1, в первых трех режимах получились одинаковыми и равными 0,983 и 0,017 соответственно. Это представляется маловероятным, так как означает, что все три режима эквивалентны по своему действию на техническое состояние выключателя. В связи с этим можно сделать вывод о недопустимости применения данного метода на практике из-за его небольшой точности. Учитывая простоту и наглядность этого метода, его можно применять лишь для грубой проверки, предшествующей, например, расчетам по методам 2 и 3.

В методе 2 по паспортным данным на выключатель производится построение монотонной зависимости (рис. 2), которой фактически заменяется ступенчатый график, полученный по методу 1 (рис. 1). Такой подход несколько уточняет расчеты, так как применяется интерполяция данных на участках между заданными точками. Этот метод не сложнее предыдущего для ручного расчета, т.к. при расчете нормативные данные берутся не из таблицы или ступенчатого графика, как в методе 1, а по соответствующей гладкой графической зависимости. Отметим, что результаты, полученные по данному методу для того же выключателя, отличаются друг от друга для разных режимов и не соответствуют результатам, полученным по методу 1. Таким образом, такой подход больше соответствует действительности и логике событий. Кроме того, данный метод предлагает специфические критерии для вывода выключателей в ремонт по техническому состоянию. Причем момент вывода определяется с запасом, так как учитывается лишь максимальное значение тока КЗ на участке сети, защищаемой выключателем. Очевидно, что метод 2 является усовершенствованным методом 1.

Логическим продолжением методов 1 и 2 стала разработка аналитической зависимости, способной точно описать полученную в методе 2 гладкую кривую. Метод 3 предлагает для этого гиперболическую функцию вида (11). Анализ рис. 4 и данных табл. 8 показывает, что подобранная кривая хорошо подходит для описания зависимости допустимого количества коммутаций от величины коммутируемого тока. Результаты расчетов, полученные по этому методу, по величине несколько отличаются от результатов, полученных по предыдущему методу.

Однако авторы метода 3 в своих работах не приводят никаких критериев вывода выключателя в ремонт по техническому состоянию. Целесообразным было бы использовать такой же критерий, как и в методе 2: выключатель (полюс выключателя) должен быть выведен в ремонт, если при следующем отключении полюсом выключателя тока КЗ расход его коммутационного ресурса может превысить единицу. Необходимо отметить, что полученная гиперболическая зависимость удобна для автоматизированных расчетов на ЭВМ, а также тем, что ресурсная характеристика выключателя описывается всего лишь двумя коэффициентами A и B .

На наш взгляд, наиболее разработанным и продуманным из трех рассмотренных методов является метод 2, так как он обладает повышенной точностью по сравнению с методом 1 и, возможно, с методом 3, так как гиперболическая кривая не может идеально описать гладкую кривую, полученную по методу 2. Метод 2, в отличие от остальных, предлагает условия для вывода выключателя в ремонт по техническому состоянию. Кроме того, он пригоден для применения как на ЭВМ, так и для ручного счета, так как гладкую кривую всегда можно представить ступенчатой с необходимым числом равномерных или неравномерных участков.

Метод 4. В настоящее время особенно актуальным стал вопрос о применении инструментальных методов контроля состояния высоковольтных выключателей. Это связано с тем, что данные методы позволяют выявить ряд дефектов, которые не могут быть выявлены с помощью проведения ремонтной диагностики, а также позволяют более точно спрогнозировать величину сработанного и остаточного ресурса. На базе различных инструментальных методов контроля (инфракрасная термография, вибродиагностика и т.д.) с применением современной вычислительной техники создаются автоматизированные экспертные системы, ярким примером которых является система диагностики состояния и оценки остаточного ресурса высоковольтных выключателей «Никта» фирмы ПФФ «ВИБРО-ЦЕНТР». Данная система контролирует следующие параметры работы высоковольтных выключателей:

- время замыкания и размыкания главного контакта каждой из трех фаз с точностью до 0,1 мс;
- скорость движения контактов в процессе замыкания, динамические удары в моменты «распускания» привода, касания контактов, фиксации привода;
- характер, время «установления» и величину сопротивления цепи главного контакта;
- временные фазы и динамические нагрузки в механической системе выключателя в процессе коммутации;
- процессы затухания собственных резонансных колебаний выключателя в различные фазы коммутации.

По итогам обработки замеров экспертная часть системы «Никта» автоматически определяет параметры технического состояния выключателя:

- остаточный технический ресурс выключателя в процентах от ресурса условно «нового» выключателя;
- остаточный коммутационный ресурс выключателя в процентах от начального ресурса;
- коэффициент обобщенного технического состояния выключателя, коэффициент состояния главного контакта выключателя и коэффициент состояния механической системы выключателя.

Также большой интерес вызывают представленные в расширенной справке 23 параметра, взятые из графиков происходящих процессов (вибрация, ток управления, ток через главные контакты, напря-

жение на главных контактах, их сопротивление и, при подключенном датчике перемещения, скорость движения контактов). Эти параметры представлены в табл. 9.

Таблица 9. Параметры состояния выключателя, контролируемые системой «Никта»

Наименование параметра	Вес параметра	Описание
По замеру на включение		
1. Время включения, с	5	Определяется как время от момента подачи управляющего импульса до момента создания цепи для протекания тока
2. Скорость движения, м/с	2	Определяется как отношение длины хода контактов к интервалу времени от момента «расслабления» привода до момента первого касания контактов (средняя скорость). Время «расслабления» привода берется по виброудару. Если такого виброудара нет, то для расчета используется время подачи управляющего импульса на управление выключателем. Если регистрация производится с использованием датчика скорости, то это значение (максимальная скорость) берется из полученного сигнала
3. Время установления, мс	4	Рассчитывается по кривой изменения сопротивления, которая, в свою очередь, рассчитывается по закону Ома при известных кривых изменения тока и падения напряжения. За численное значение времени полного установления рабочего сопротивления главной цепи берется интервал времени от первого касания контактов до момента, когда «броски» значения сопротивления перестанут превышать 20 % от установившегося значения
4. Количество пульсаций	2	Под пульсацией сопротивления понимаются «разрывы главной цепи выключателя» после первого касания контактов. В моменты «разрывов» нарушается цепь главного контакта выключателя. Количество таких «разрывов» цепи зависит от типа выключателя и его состояния. В реальных условиях при включении выключателя бывает до десяти пульсаций за время в 0,01–0,02 с
5. Коэффициент заполнения	3	Этот коэффициент рассчитывается на временном интервале, начиная с первого касания контактов до момента установления рабочего значения сопротивления. Он учитывает соотношение периодов времени, когда контакты были замкнуты и когда разомкнуты, и степень изменения сопротивления в моменты «отскоков» контактов. На участке установления (дребезга) среднее сопротивление (посчитанное через интеграл) делится на размах в сопротивлении (максимум минус минимум)
6. Сопротивление контакта, мкОм	4	Омическое сопротивление контакта фазы рассчитывается по известным значениям тока, протекающего через контакт, и величины падения напряжения на контакте в установившемся режиме после замыкания
7. Разновременность, мс	2	Разница данной фазы с первой сомкнувшейся
Динамические параметры механизма включения рассчитываются на участке длительностью 55 мс до первого касания контактов		
8. Амплитуда виброудара, G	1	Регистрируется по кривой изменения вибрации в размерности виброускорения. Характеризует интенсивность динамических процессов в выключателе в первые моменты времени. А) на участке находится максимальное по модулю значение; Б) от данного значения на участке ± 5 мс находится максимальное по модулю, но обратное по знаку значение; В) амплитуда виброудара равна полусумме модулей этих двух величин
9. Коэффициент снижения амплитуды по частоте	0,5	А) участок сигнала раскладывается в спектр; Б) аппроксимируется к прямой; В) коэффициент затухания определяется по соотношению амплитуды в начале и конце спектра.
10. Коэффициент стационарности сигнала	0,5	А) все пики сигнала аппроксимируются к прямой; Б) коэффициент стационарности определяется по соотношению амплитуды в начале и конце сигнала (участка)
Динамические параметры замыкания контактов рассчитываются на участке от первого касания до времени включения + 5 мс		
11. Амплитуда виброудара, G	0,8	На временном графике вибрации данный момент определяется как точка первого касания всех контактов главной цепи. Данный параметр характеризует динамические удары между подвижным и неподвижным контактами. Он косвенно характеризует конечную скорость движения контакта и, в выключателях некоторых типов, «точность влета» одного контакта в другой. А) на участке находится максимальное по модулю значение; Б) от данного значения на участке ± 5 мс находится максимальное по модулю, но обратное по знаку значение; В) амплитуда виброудара равна полусумме модулей этих двух величин
12. Коэффициент снижения амплитуды по частоте	0,4	А) участок сигнала раскладывается в спектр; Б) аппроксимируется к прямой; В) коэффициент затухания определяется по соотношению амплитуды в начале и конце спектра
13. Коэффициент стационарности сигнала	0,4	А) все пики сигнала аппроксимируются к прямой; Б) коэффициент стационарности определяется по соотношению амплитуды в начале и конце сигнала (участка)
Динамические параметры фиксации рассчитываются на участке от времени включения + 5 мс до времени включения + 30 мс		
14. Амплитуда виброудара, G	1	А) на участке находится максимальное по модулю значение; Б) от данного значения на участке ± 5 мс находится максимальное по модулю, но обратное по знаку значение; В) амплитуда виброудара равна полусумме модулей этих двух величин.

15. Коэффициент снижения амплитуды по частоте	0,6	А) участок сигнала раскладывается в спектр; Б) аппроксимируется к прямой; В) коэффициент затухания определяется по соотношению амплитуды в начале и конце спектра.
16. Коэффициент стационарности сигнала	0,6	А) все пики сигнала аппроксимируются к прямой; Б) коэффициент стационарности определяется по соотношению амплитуды в начале и конце сигнала (участка)
Параметры по замеру на отключение рассчитываются на участке от времени отключения + 30 мс до времени отключения + 50 мс		
17. Время отключения, мс	3	Определяется как время от момента подачи управляющего импульса до момента полного размыкания всех контактов в главной цепи выключателя
18. Скорость движения, м/с	2	Максимальная на участке движения (для замеров с ДП)
19. Время установления, мс	1	Время от первого всплеска до окончательной ликвидации цепи
20. Амплитуда виброудара, G	1	Регистрируется по кривой изменения вибрации в размерности виброускорения. Характеризует интенсивность динамических процессов в выключателе при отключении. А) на участке находится максимальное по модулю значение; Б) от данного значения на участке ± 5 мс находится максимальное по модулю, но обратное по знаку значение; В) амплитуда виброудара равна полусумме модулей этих двух величин
21. Коэффициент снижения амплитуды по частоте	1	А) участок сигнала раскладывается в спектр; Б) аппроксимируется к прямой; В) коэффициент затухания определяется по соотношению амплитуды в начале и конце спектра
22. Коэффициент стационарности сигнала	1	А) все пики сигнала аппроксимируются к прямой; Б) коэффициент стационарности определяется по соотношению амплитуды в начале и конце сигнала (участка)
23. Разновременность, мс	2	Разница данной фазы с первой разомкнувшейся

Экспертной частью системы «Никта» расчет ведется по следующему алгоритму:

1. После того как было проведено не менее шести пар (включение-отключение) замеров по отдельным фазам выключателей данной марки (фактически для трехполюсного выключателя это два цикла В-О) и системой по команде пользователя проведена для них операция «расчет и диагностика», создаются нормы. Их рекомендуется вычислять по максимально большому числу замеров с разных выключателей одной марки. Выключатели рекомендуется выбирать из числа новых или отремонтированных. Некоторые нормы имеет смысл исправить (что программа позволяет сделать), так как часто реальные параметры выключателя гораздо лучше паспортных. Обычно корректируются известные нормы, такие как: полное время включения и отключения, максимальная или средняя скорость движения главного контакта, значение сопротивления главного контакта.

2. Программой за норму, если не внесены корректировки, берется среднее арифметическое параметров из замеров, отмеченных пользователем для вычисления норм.

3. Коэффициент технического состояния главного контакта фазы выключателя $K_{ЭК}$ интегрально учитывает общее состояние всех разрывов цепи контакта и определяется на основе времени установления постоянного рабочего сопротивления главной цепи фазы выключателя, количества пульсаций сопротивления, коэффициента заполнения и собственного омического сопротивления контакта фазы.

4. По полученным данным системой «Никта» рассчитываются, помимо коэффициентов технического состояния главных контактов фаз выключателя, также коэффициенты состояния механической системы, итоговый коэффициент состояния выключателя и коммутационный и технический ресурсы выключателя по каждой фазе.

5. Коэффициент состояния механической системы $K_{МС}$ учитывает все вибрационные параметры, скорость движения главного контакта и временные параметры.

6. Итоговый коэффициент состояния выключателя K_{Σ} определяется совокупностью всех параметров, относящихся как к контактам, так и к механической системе.

7. Остаточный коммутационный ресурс фазы выключателя $R_{КОМ}$ учитывает ухудшение состояния главных контактов в процентах от «идеального», а остаточный технический ресурс $R_{ТЕХ}$ – ухудшение состояния и главных контактов и механической системы. При этом если остаточный ресурс выключателя составляет более 36 %, то считается, что он может достаточно надежно произвести отключение короткого замыкания такой мощности, какая указана в паспорте на выключатель.

Основными параметрами, непосредственно и существенно характеризующими состояние воздушного выключателя, являются остаточные ресурсы и коэффициенты состояния.

Расчет параметров состояния выключателя производится экспертной системой исходя из данных табл. 9:

1. Коэффициент состояния главных контактов:

$$K_{ЭК} = \frac{\sum P_i V_i}{\sum V_i} \quad (18)$$

2. Промежуточный коэффициент механической системы:

$$K_M = \frac{\sum P_i V_i}{\sum V_i} \quad (19)$$

где V_i – вес соответствующего параметра из табл. 9; P_i – отклонение соответствующего параметра при превышении его значения над нормой (для параметров 2 и 18 – при превышении нормы над значением), в противном случае отклонение равно 1.

В расчет коэффициента состояния главного контакта $K_{ЭК}$ входят параметры №3, 4, 5, 6, а промежуточного коэффициента механической системы K_M – параметры № 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23 (здесь и далее номера параметров соответствуют их номерам в табл. 9).

По результатам расчетов выбирается коэффициент, имеющий наименьшее значение:

$$K_{\min} = \min(K_{\text{ЭК}}, K_M), \quad (20)$$

Тогда

$$K_{\text{УР}} = \frac{(K_{\text{ЭК}} - 0,3 * (K_{\text{ЭК}} - K_{\min}))}{2} + \frac{(K_M - 0,3 * (K_M - K_{\min}))}{2}. \quad (21)$$

3. Коэффициент $K_{\text{УМ}}$ рассчитывается по выражению (18) исходя из параметров №17, 19, 20, 21, 22 табл. 9.

4. Итоговый коэффициент состояния механической системы:

$$K_{\text{МС}} = \frac{(3K_M + K_{\text{УМ}})}{4}. \quad (22)$$

5. Итоговый коэффициент состояния выключателя:

$$K_{\text{Г}} = \frac{(3K_{\text{УР}} + K_{\text{УМ}})}{4}. \quad (23)$$

6. Коммутационный ресурс выключателя:

$$R_{\text{КОМ}} = \frac{285(2K_{\text{ЭК}} + K_{\text{ЭК}}^2)}{3} - 175. \quad (24)$$

7. Технический ресурс выключателя:

$$R_{\text{МЕХ}} = 360K_{\text{Г}} - 252. \quad (25)$$

Экспертная система «Никта» позволяет проводить оценку текущего технического состояния и диагностики дефектов, а также определение остаточного коммутационного ресурса высоковольтных выключателей без разборки.

Коэффициенты состояния идеального по техническому состоянию выключателя в данной системе количественно равны единицам. При ухудшении состояния значения коэффициентов состояния тоже уменьшаются. Остаточный ресурс в 100 % имеет выключатель, находящийся в идеальном состоянии. Ресурс в 0 % имеет выключатель, который, условно говоря, «еще работает», но уже не может произвести безаварийное отключение короткого замыкания такой мощности, которая указана в паспорте на этот выключатель. Промежуточное (от 100 до 0 %) значение остаточного ресурса отражает степень ухудшения технического состояния контактов выключателя в процессе работы. Полученных значений эксплуатационных параметров выключателя должно быть достаточно для организации обслуживания, ремонтов и замен выключателей по их техническому состоянию.

Количественно для коэффициентов технического состояния в программе приняты следующие усредненные диапазоны технического состояния выключателя:

- от 1,0 до 0,9 – зона хорошего состояния контролируемого параметра, что соответствует нормальной работе выключателя;

- от 0,9 до 0,8 – зона удовлетворительного состояния контролируемого параметра, что соответствует «тревожному» состоянию выключателя (в этой зоне очень важным является выявление тенденций изменения общего состояния в «худшую» сторону, что говорит об интенсивном ухудшении состояния);

- от 0,8 и менее – зона неудовлетворительного состояния контролируемого параметра (при таком значении параметров выключателя, особенно при их периодическом «ухудшении», следует принимать решение, как минимум, об усиленном контроле всеми

средствами, а лучше – о проведении регламентных и ремонтных работ).

Просто и достаточно точно описывают текущее техническое состояние выключателя остаточные ресурсы, выражаемые в процентах от ресурсов нового, идеального по состоянию, выключателя.

Экспертной частью системы «Никта» по итогам обработки результатов экспериментальных исследований рассчитываются два остаточных ресурса:

- 1) остаточный коммутационный ресурс главных контактов контролируемого выключателя;

- 2) остаточный технический ресурс всех элементов и узлов контролируемого выключателя.

В идеале остаточный ресурс равен 100 %. Если остаточный ресурс выключателя составляет 36 % и более, то такой выключатель может достаточно надежно произвести отключение короткого замыкания такой мощности, какая указана в паспорте на выключатель (по данным экспертной системы). При меньшем остаточном ресурсе надежность безаварийного отключения короткого замыкания сохраняется, но уменьшается. При 0 % остаточного ресурса нормальное отключение номинального тока короткого замыкания маловероятно. Выключатель может работать в нормальных режимах, но в аварийных ситуациях его надежность уже недостаточна.

Очень важным является выявление тенденций ухудшения состояния. Скачок уменьшения коэффициента общего состояния выключателя говорит об интенсивном ухудшении состояния. Такое резкое ухудшение требует пристального внимания к выключателю, независимо от того, в какой зоне по состоянию он находится.

Система «Никта» предлагает еще один показатель, характеризующий состояние фаз выключателей и выражающийся качественными оценками «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

При оценке состояния выключателей необходимо ориентироваться на являющиеся первичными (из перечисленных показателей) коэффициенты состояния главного контакта $K_{\text{ЭК}}$ и механической системы $K_{\text{МС}}$.

Если по результатам диагностики величины $K_{\text{ЭК}}$ или $K_{\text{МС}}$ находятся в пределах 0,9–0,8, то выключателю проводится ремонт в объеме текущего, а также проводятся высоковольтные испытания и замеры напряжения срабатывания соленоидов. По завершению ремонта выключатель вводится в работу, следующий срок капитального ремонта (КР) устанавливается через 2 года.

Если по результатам диагностики величины $K_{\text{ЭК}}$ и $K_{\text{МС}}$ оказались менее 0,8, то выключатель подвергается ремонту в объеме капитального. После проведения ремонта выключатель снова диагностируется системой «Никта», следующий срок КР устанавливается через 8 лет, если коэффициенты находятся в пределах 1–0,9, или через 4 года, если коэффициенты находятся в пределах 0,9–0,8.

В случае неудовлетворительных результатов, полученных после повторного КР, выключатель выводится из эксплуатации и должен быть заменен другим.

При составлении графика КР высоковольтных выключателей одновременно составляется график их диагностики, куда включаются выключатели, у которых $K_{\text{ЭК}}$ или $K_{\text{МС}}$ менее 0,9.

- Таким образом, система «Никта» функционирует на основе методов вибродиагностики с использованием хорошо известного метода весовых коэффициентов. Важной особенностью метода 4 является то,

что контролируемые системой 23 параметра, каждый из которых, в принципе, может являться диагностическим признаком, посредством метода весовых коэффициентов сводятся к нескольким интегральным характеристикам, количественно характеризующим общий уровень технического состояния выключателя. Кроме того, на основании полученных данных можно сделать отдельно выводы как об общем уровне технического состояния выключателя (технический ресурс и коэффициент технического состояния выключателя), так и о состоянии отдельных его частей: главного контакта (коэффициент состояния главного контакта) и механической системы (коэффициент состояния механической системы). На основании полученных численных данных по ресурсу и коэффициентам технического состояния *метод 4* позволяет выдать словесные рекомендации об уровне технического состояния выключателя: «хорошее», «удовлетворительное», «неудовлетворительное», а кроме того, определить моменты вывода выключателя в ремонт, а также необходимость усиленной диагностики состояния.

- *Метод 4* может применяться только с использованием ЭВМ, так как необходимо автоматически контролировать входные параметры и постоянно рассчитывать значения коэффициентов, что требует наличия соответствующего программного обеспечения. Также необходимо иметь средства накопления информации о состоянии выключателя и для хранения экспертной базы знаний.

При всех перечисленных достоинствах данный метод обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что все весовые коэффициенты, а также выдаваемые рекомендации основываются на экспертных данных, которые не всегда подтверждаются практикой эксплуатации. Причем проверить экспертные оценки чрезвычайно сложно, особенно для весовых коэффициентов. Хотя *метод 4* и учитывает 23 параметра, на основании данных о которых выводятся конечные результаты, все они основаны на данных вибродиагностики и не учитывают другие особенности, например, температурные, химические, электрические и т.д. Также не решен вопрос о возможности перехода от относительных единиц измерения ресурса к именованным.

- В целом по данному методу необходимо отметить, что, несмотря на все приведенные недостатки, *метод 4* позволяет реально осуществить переход от системы ППР к системе ТОР по техническому состоянию для высоковольтных выключателей.

Метод 5. Другим принципиально отличным направлением в оценке уровня технического состояния выключателей и электрооборудования в целом является подход, изложенный в [10]. В табл. 1 приведены несколько методов, пригодных для оценки ресурса высоковольтных выключателей. При этом необходимо отметить, что *метод 4* рассмотрен лишь на примере одной автоматизированной экспертной системы. В действительности же их существует огромное множество, и каждая из них выдает свои количественные результаты. Практически каждая программа имеет свои алгоритмы обработки. Большинство диагнозов выдается в словесной форме, которые, в свою очередь, основываются на хотя бы просто измеренных численных данных. Указанные особенности существенно затрудняют возможность объединения различных разработок. Учитывая это, автор *метода 5* осуществляет попытку объединить различные исследования на базе алгоритма определения состояния объекта по комплексу

измеряемых параметров. *Метод 5* не конкретизирован на использование только для высоковольтных выключателей, однако, на наш взгляд, его необходимо рассмотреть.

Предлагается оценивать состояние выключателя по каждому i -му параметру функцией остаточного ресурса вида $R_i = f(A_{Hi}, A_{Ki}, A_i)$, где $i = 1, \dots, m$ – количество измеряемых параметров объекта A_i , характеризующих его работоспособность. Параметр A_i изменяется в диапазоне от начального значения A_{Hi} до конечного значения A_{Ki} , после достижения которого объект теряет возможность функционирования по разным причинам (физическим, техническим и т.д.). Самым простым выражением для описания зависимости R_i является выражение вида

$$R_i = \frac{A_{Ki} - A_i}{A_{Ki} - A_{Hi}}. \quad (26)$$

Более удачной и универсальной зависимостью автор *метода 5* считает зависимость вида

$$R_i = \log_n \left(1 + (n-1) \frac{A_{Ki} - A_i}{A_{Ki} - A_{Hi}} \right), \text{ где } n \neq 1. \quad (27)$$

Зависимость (27) представлена на рис. 5 для различных значений коэффициента n при условии $A_{Hi} = 0$, $A_{Ki} = 10$.

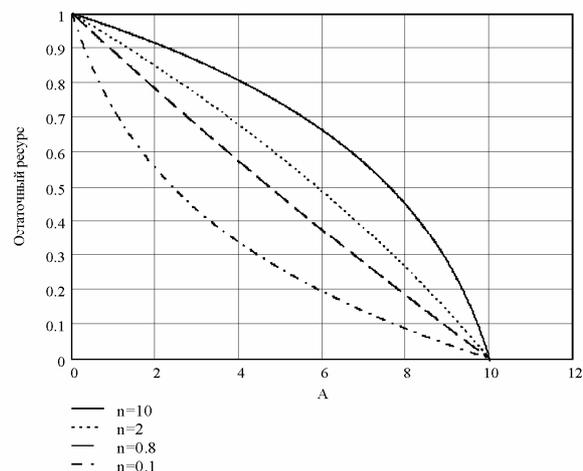


Рис. 5. Зависимость остаточного ресурса по i -му параметру от величины параметра A

Взаимосвязь между остаточным ресурсом объекта R_0 и значениями остаточных ресурсов по каждому параметру R_i предлагается записывать в виде $R_0 = \sum R_i \rho_i$, (28)

где ρ_i – весовой коэффициент доли каждого из параметров R_i в общем ресурсе R_0 .

Таким образом, *метод 5*, как и *метод 4*, основан на сведении многочисленных измеренных параметров к одному интегральному показателю – ресурсу. В обоих случаях эта процедура осуществляется с помощью применения метода весовых коэффициентов. Отличие состоит лишь в том, что *метод 5* предлагает лишь подход к определению остаточного ресурса, причем измеряемые параметры могут быть любыми, даже, например, коэффициентами, рассчитанными системой «Никта», а *метод 4* учитывает лишь параметры, получаемые в результате вибродиагностики. *Метод 5* является недоработанным. Кроме того, в [10] не рассматриваются никаких примеров применения его на практике. Поэтому *метод 5* не является законченным, в

отличие от системы «Никта» и метода 4, поэтому применение его на практике невозможно.

Метод 6. Согласно этому методу, сработанный за время t ресурс можно представить в виде функции вероятности безотказной работы оборудования P , а соответственно, в нашем случае высоковольтного выключателя:

$$R_{cp} = -\ln(P). \quad (29)$$

Как уже отмечалось выше, за единицы измерения ресурса часто принимают временные единицы. Тогда относительный сработанный ресурс в самом простом его выражении можно представить в следующем виде:

$$R_{cp} = \frac{t}{T_0}, \quad (30)$$

где T_0 – нормативный (установленный) срок службы; t – фактическое время работы оборудования.

Запишем экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы:

$$P = e^{-\lambda t}, \quad (31)$$

где $\lambda = \text{const}$ – интенсивность отказов.

Выразим из выражения (31) величину λt :

$$\lambda t = -\ln P. \quad (32)$$

Учитывая

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \quad (33)$$

можно записать выражение вида

$$\frac{t}{T_0} = -\ln P. \quad (34)$$

Подставив выражение (30) в (34), получаем искомое выражение (29). Графически зависимость (29) имеет вид, отраженный на рис. 6.

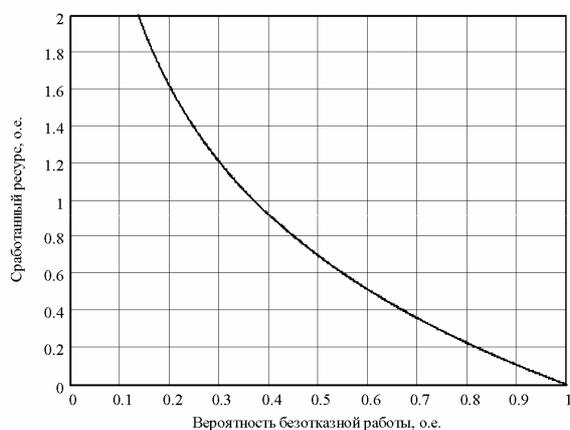


Рис. 6. Зависимость сработанного ресурса от вероятности безотказной работы

Выражение (29) является связью между показателями безотказности, к которым в данном случае относится вероятность безотказной работы P , и показателями долговечности, к которым относится величина сработанного ресурса. В выражениях (30)–(34) приведен вывод выражения (29) для экспоненциального закона распределения вероятности безотказной работы. В случае применения других законов распределения необходимо произвести дополнительные математические выводы или проверить на практике утверждение (29). Выражение (29) несомненно является важным, так как позволяет по уже известным данным [11] об интенсивности отказов перейти к соответствующим значениям сра-

ботанного ресурса. На базе этого подхода проведены многовариантные исследования, позволившие получить конкретный результат. Важно отметить, что применение метода 6 возможно и на ЭВМ, что позволяет легко автоматизировать процесс расчета ресурса оборудования. На этой базе возможно осуществить планирование ТОР по техническому состоянию. Однако для этого необходимо разработать критерии вывода оборудования в ремонт. Кроме того, данный метод не учитывает эксплуатационные факторы, воздействующие на оборудование, а основывается лишь на статистических данных, полученных для оборудования, работающего в различных условиях. Поэтому полученные значения являются приближенными. Также не решен вопрос о возможности перехода от относительных единиц измерения ресурса к именованным.

Анализ методов 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Первые три метода основаны на построении зависимости допустимого числа коммутаций от величины коммутируемого тока различными способами на основании паспортных данных выключателя. Методы 4 и 5 основаны на применении метода весовых коэффициентов. Методы 1, 2 и 3 используют единственный эксплуатационный фактор, влияющий на сработанный и остаточный ресурс, – это величина коммутируемого тока. Ресурс во всех этих методах понимается как количество фактически совершенных коммутаций, отнесенное к допустимому количеству. Методы 4 и 5 учитывают большое множество параметров, на основании данных о которых выводится интегральный показатель уровня технического состояния высоковольтного выключателя. Отличным от всех остальных является метод 6, позволяющий связать показатели безотказности и долговечности. Метод 6 основывается на статистических данных, поэтому результаты для конкретной единицы оборудования, а в нашем случае для выключателей, будут приближенными. Кроме того, ставится под сомнение возможность его использования при применении любого другого закона распределения вероятности безотказной работы, отличного от экспоненциального.

Для удобства выявления достоинств и недостатков каждого из шести перечисленных методов составим сравнительную таблицу (табл. 10).

Проведем горизонтальный анализ рассмотренных методов с помощью табл. 10. При этом отметим особенности методов по каждому из приведенных параметров сравнения.

1. Все рассматриваемые методы позволяют получить численное значение сработанного ресурса. На основании результирующих численных значений можно сделать выводы об уровне технического состояния оборудования и с той или иной степенью точности определить необходимость проведения профилактического мероприятия.

2. Первые два метода, а также метод 6, судя по нормативным документам, регламентирующим их использование, явно не позволяют получить значение остаточного ресурса. Однако все приводимые рассуждения, в принципе, подразумевают возможность использования выражения (3) для расчета его значения. Все остальные методы дают возможность оценить значение остаточного ресурса. Найденное значение остаточного ресурса позволяет определить оставшуюся наработку выключателя до наступления предельного состояния.

Таблица 10. Сравнительная таблица существующих методов оценки технического состояния высоковольтных выключателей

Параметр сравнения методов	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4	Метод 5	Метод 6
1. Возможность расчета численного значения сработавшего ресурса	позволяет	позволяет	позволяет	позволяет	позволяет	позволяет
2. Возможность расчета численного значения остаточного ресурса	позволяет (теор.)	позволяет (теор.)	позволяет	позволяет	позволяет	позволяет (теор.)
3. Количество учитываемых факторов	1	1	1	23	∞	обычно 1, 2 (в зависимости от закона распределения)
4. Возможность перехода от относительных единиц к именованным	имеется	имеется	имеется	не обоснована	не обоснована	не обоснована
5. Возможность автоматизации метода с помощью вычислительной техники	имеется (0)	имеется (1)	имеется (0)	имеется (2)	имеется (1)	имеется (0)
6. Наличие словесных оценок технического состояния оборудования	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	состояние хорошее, удовл., неудовл.	отсутствуют	отсутствуют
7. Наличие критерия вывода оборудования в ремонт	отсутствует	присутствует	отсутствует	присутствует	отсутствует	отсутствует
8. Возможность определения места повреждения	отсутствует	отсутствует	отсутствует	присутствует	присутствует (теор.)	отсутствует
9. Учет истории эксплуатации оборудования	да	да	да	нет	нет	нет
10. Возможность прогнозирования значения ресурса	отсутствует	присутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует
11. Возможность перевода оборудования на ремонт по техническому состоянию	маловероятно	возможно	возможно	имеется	маловероятно	маловероятно
12. Наличие дополнительных данных о техническом состоянии оборудования	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	присутствуют	отсутствуют	отсутствуют
13. Базовый метод	необходимы паспортные данные по числу допустимых коммутаций	необходимы паспортные данные по числу допустимых коммутаций, интерполяция	необходимы данные по числу допустимых коммутаций или коэффициенты A и B , аппроксимация	метод весовых коэффициентов, экспертная оценка	метод весовых коэффициентов	принцип Седякина
14. Простота	очень простой	простой	сложный	очень сложный	нормальный	нормальный
15. Период времени, за который происходит сработка ресурса	межремонтный интервал	межремонтный интервал	межремонтный интервал	не определено	не определено	∞ (срок службы оборудования)
16. Наличие аналитических зависимостей для определения ресурса	отсутствуют	отсутствуют	присутствуют	присутствуют	присутствуют	присутствуют
17. Область применения метода	выключатели выше 1000 В	выключатели выше 1000 В	выключатели выше 1000 В	выключатели выше 1000 В	любое ЭО	любое ЭО
18. Возможность применения метода совместно с другими	не ясна	не ясна	не ясна	не ясна	объединяющий метод	не ясна
19. Учет экономической стороны определения ресурса	нет	нет	нет	нет	возможно	нет
20. Примеры использования или внедрения данного метода	внедрено	внедрено	примеры	внедрено	нет	примеры расчетов для разных законов распределения
21. Потребность в спец. оборудовании	нет	нет	нет	нет	да	нет
22. Обязательное наличие программного обеспечения для реализации метода	нет	нет	нет	да	нет	нет

3. На любое ЭО в процессе эксплуатации оказывают воздействие различные эксплуатационные факторы. Очевидно, что все они влияют на величину ресурса, поэтому чем большее количество эксплуатационных факторов учитывает метод, тем точнее получается значение ресурса. При этом необходимо учитывать достоверность исходных данных и применяемых методов, а также используемых коэффициентов. Первые три метода учитывают лишь один единственный эксплуатационный фактор – коммутируемый ток. Однако необходимо отметить, что данный фактор оказывает наибольшее влияние на значение ресурса, так как оказывает тепловое, электрическое, механическое и косвенно химическое воздействие на оборудование. *Метод 5* позволяет учесть любое количество эксплуатационных факторов. *Метод 6* учитывает скорее не эксплуатационные факторы, а статистические, такие как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и т.д. В этом состоит основное отличие этого метода от остальных по данному параметру сравнения.

4. Полученные значения эксплуатационных факторов должны позволять судить о том, какое фактическое время или какое количество коммутаций уже отработал выключатель по отношению к нормативному и какое еще может отработать. Поэтому важным достоинством метода определения ресурса является возможность перехода от относительного значения ресурса к временным или дискретным единицам, таким как количество коммутаций. К сожалению, только три первых из рассматриваемых методов дают возможность рассчитать ресурс в именованных единицах. Остальные методы теоретически имеют такую возможность, но для них не описан механизм перехода от относительных единиц к именованным.

5. Для практического использования методов в ремонтной деятельности важным их достоинством является возможность автоматизации. Всем рассматриваемым методам был присвоен индекс, значение которого характеризует легкость автоматизации метода с использованием вычислительной техники. В основу этого индекса были положены следующие свойства: наличие аналитической зависимости, потребность в хранении экспертной базы, а также простота расчета. Индекс 0 соответствует уровню «самый легкий», 1 – «легкий», 2 – «сложный». Очевидно, что самыми удобными для применения на ЭВМ являются *методы 1, 3 и 6*. При этом надо помнить, что простота метода обычно ведет к снижению его точности и достоверности получаемых данных.

6. После получения численных значений ресурса необходимо каким-либо образом охарактеризовать техническое состояние высоковольтного выключателя. Одним из возможных методов описания состояния оборудования является словесная оценка. Все рассматриваемые методы, кроме *метода 4*, не содержат в своей концепции таких словесных оценок. Однако подразумевается, что при выходе ресурса за допустимые границы выключатель становится неработоспособным, при нахождение величины ресурса в допустимых границах – выключатель работоспособен. В *методе 2* предусмотрено работоспособное состояние выключателя, при котором он все-таки требует капитального ремонта (критерий вывода в ремонт). *Метод 4* дает три характеристики состояния выключателя: «хоро-

шее», «удовлетворительное», «неудовлетворительное» (см. табл. 10).

7. Оборудование должно выводиться в ремонт не только при достижении остаточным ресурсом нулевого значения, но и по определенному критерию, характеризующему необходимый запас ресурса [8]. В основном это связано с периодичностью проведения мероприятий в системе ППР, так как при низком значении остаточного ресурса выключатель может просто не доработать до следующего профилактического мероприятия. *Методы 2 и 4* имеют такие критерии, остальные – нет.

8. Достоинством любого метода из вышеперечисленных методов является возможность получения информации об узле или сборочной единице, которая исчерпала свой ресурс. Реально такой возможностью обладает лишь *метод 4*, т.к. в нем кроме значений ресурса по разным узлам (главный контакт, механическая система и т.д.) рассчитываются дополнительные коэффициенты технического состояния. *Метод 5* теоретически может обладать такой возможностью, если по нему рассчитывать ресурс отдельных узлов. В обоих этих методах возможность определения места повреждения связана с учетом специфических параметров или расчетом значений ресурса для разных узлов. *Методы 1, 2 и 3* дают возможность определить коммутационный ресурс. Они в основном характеризуют состояние дугогасительной камеры, а только потом – всех остальных узлов. *Метод 6* в классическом виде не позволяет определить место повреждения в принципе.

9. Величины сработанного и остаточного ресурса являются показателями долговечности оборудования. Поэтому является очевидным тот факт, что методы, используемые для расчета ресурса, должны учитывать наработку оборудования до момента расчета, т.е. историю эксплуатации. Первые три метода учитывают историю эксплуатации, остальные – нет. Однако *методы 1, 2 и 3* учитывают лишь один эксплуатационный фактор, который воздействовал на выключатель, – историю коммутаций выключателя.

10. Аварийные ситуации в энергосистеме носят вероятностный характер. Для расчета величины остаточного ресурса очень важно уметь прогнозировать характер воздействия эксплуатационных факторов. Такой возможностью обладает лишь *метод 2*. Также следует отметить, что в этом плане его возможности сильно ограничены и сводятся к анализу статистической информации. Остальные методы вообще не позволяют учитывать эксплуатационные факторы.

11. Одной из основных целей разработки всех математических методов и моделей в сфере энергоремонта является повышение эффективности работы оборудования. На сегодняшний день доказано, что это возможно осуществить с помощью перехода от системы ППР к системе ТОР по техническому состоянию. Расчет значения ресурса является одной из ключевых задач, требующих решения в этом случае. К сожалению, *методы 1, 5 и 6* не позволяют этого сделать в полном объеме в связи с их недостаточной разработанностью и высокой методической погрешностью, особенно для *метода 1*. *Методы 2 и 3* позволяют это сделать после небольшой доработки, создания специализированного программного обеспечения, а также разработки нормативных требований, основанных на полученных значениях ресурса. *Метод 4* позволяет это

сделать, так как на его основе разработан автоматизированный комплекс, так называемый виброцентр «Никта», который позволяет решать все необходимые задачи, связанные с переходом от системы ППР к системе ТОР по техническому состоянию. С другой стороны, *метод 4* основан на экспертных оценках и контролирует лишь вибропараметры выключателя, поэтому необходима его широкая проверка на практике.

12. Дополнительные характеристики, получаемые на основе применяемого метода определения ресурса, могут помочь в описании технического состояния выключателя, а также определить место повреждения и слабые узлы. Такие коэффициенты имеет лишь *метод 4*, но их мало. Другие методы вообще не имеют таких коэффициентов. Поэтому получение комплексного представления о техническом состоянии отдельных узлов остается сложной задачей.

13. Первые три метода в своей основе имеют паспортные данные завода-изготовителя высоковольтного выключателя, по которым затем разными способами строится кривая зависимости допустимого количества коммутаций от величины коммутируемого тока, которая и является основой всех этих методов. Такой подход удобен, прост и дает результаты, отражающие действительность с достаточной степенью достоверности. Метод весовых коэффициентов, лежащий в основе *методов 4 и 5*, обладает более широкими возможностями, однако только при точном задании весовых коэффициентов. Принцип Сидякина, положенный в основу *метода 6*, широко известен в теории надежности, однако его повсеместное применение сомнительно.

14. Для применения разработанных методов на практике они должны быть простыми и понятными для персонала энергообъектов. При этом необходимо учитывать потребность в дополнительных средствах, квалифицированном персонале, а также объем расчетов. Самыми простыми являются *методы 1 и 2*. Более сложными – *методы 3, 5 и 6*. Наиболее сложным – *метод 4*.

15. Важной характеристикой метода является период времени, за который происходит сработка ресурса. В *методах 1, 2, 3* таким периодом является межремонтный интервал. Причем считается, что после капитального ремонта ресурс оборудования восстанавливается до начального значения, что не совсем корректно. В *методах 4 и 5* такой интервал не определен. В *методе 4* это связано с тем, что ресурс определяется по измеренным параметрам, а для *метода 5* обусловлено его недостаточной разработанностью. По *методу 6*, ресурс полностью никогда не срабатывается. Однако обычно этот период принимается близким по значению к нормативному сроку службы.

16. Наличие аналитических зависимостей для оценки ресурса делает расчеты и прогнозирование технического состояния выключателей более удобным. *Методы 1 и 2* такими зависимостями не обладают. *Метод 3* подбирает к зависимости, полученной по *методу 2*, аналитическую зависимость в виде гиперболической функции. *Методы 4, 5, 6* имеют выражения для расчета ресурса.

17. *Методы 1, 2, 3, 4* предназначены для определения ресурса только высоковольтных выключателей. Все остальные методы можно применить и для других типов ЭО.

18. *Метод 5*, согласно [10], может применяться совместно с другими методами в качестве средства объединения их интеллектуальной мощи. Возможность совместного применения других методов сомнительна и, на наш взгляд, может быть реализована только для сравнения и проверки результатов по различным методам. Особенно это касается первых трех методов.

19. Полная сработка ресурса выключателя наступает при достижении им предельного состояния. При этом продолжение эксплуатации выключателя нецелесообразно по техническим и экономическим причинам. Поэтому в методах целесообразно учитывать экономическую составляющую ресурса. Такая возможность, имеется только у *метода 5*, который учитывает экономические параметры с помощью соответствующих весовых коэффициентов.

20. Подтверждением возможности использования метода на практике является наличие расчетных примеров или факт внедрения метода. *Методы 1 и 2* внедрены [8, 9]. Для *метода 3* приводятся расчетные примеры [4, 6, 7]. *Метод 4* внедрен [12]. *Метод 5* недостаточно разработан и не имеет примеров расчета. Для *метода 6* приводятся примеры расчетов для разных законов распределения вероятности безотказной работы [11].

21. Существенная часть материальных и трудовых затрат, связанных с применением того или иного метода, обусловлена потребностью в специализированном оборудовании для его реализации. Только *метод 4* имеет такую потребность, поэтому он является самым дорогостоящим.

22. Разработка программного обеспечения для метода, а затем дальнейшая его эксплуатация также связаны с трудовыми и материальными затратами. Все методы, кроме *метода 4*, на данной стадии разработки не требуют специализированного программного обеспечения.

Проведенный анализ показывает, что все методы пригодны для оценки ресурса выключателей, однако обладают рядом недостатков, которые ограничивают область их практического применения. Ни один из методов не дает положительного результата по всем параметрам сравнения. Поэтому необходима разработка комплексного метода оценки технического состояния высоковольтных выключателей, способного объединить разностороннюю диагностическую информации, а также имеющиеся математические методы и модели.

Список литературы

1. www.elteh.ru
2. Токарев Л.Н. Введение в электроэнергетику. – СПб.: АЛЕС, 1999.
3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения.
4. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Методика оценки остаточного ресурса выключателей при эксплуатации // Промышленная энергетика. – 1992. – № 10. – С. 31–32.
5. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика оценки фактического ресурса электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 6. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – С. 288–306.
6. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Механическая и коммутационная износостойкость выключателей // Промышленная энергетика. – 1992. – № 8. – С. 14–16.
7. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Методика оценки коммутационного ресурса выключателей при экс-

плуатации // Промышленная энергетика. – 1995. – № 1. – С. 28–35.

8. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации. – М.: ОРГРЭС, 1992.

9. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия.

10. Пильщиков В.Е. Алгоритм определения состояния объекта по комплексу измеряемых параметров /

Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 11. ПИПК. – СПб., 2000. – С. 260–263.

11. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.

12. www.vibrocenter.ru

Андреев Дмитрий Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 26-99-43,
kafedra@esde.ispu.ru

Назарычев Илья Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент,
телефон (4932) 26-99-43.