

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Б.С. Компанеец, С.Ф. Нефедов

*В статье представлена методика получения обобщенного показателя состояния изоляции для оценки вероятности возникновения короткого замыкания на различных объектах и предложена сравнительная оценка пожарной опасности различных объектов электро-снабжения.*

*Ключевые слова: сравнительная оценка показателей пожарной опасности, состояние изоляции, вероятность возникновения короткого замыкания.*

Необходимость дополнительных исследований в области решения задач обеспечения пожарной безопасности электроустановок зданий продиктована общей ежегодной статистикой пожаров по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования. Доля пожаров такого типа составляет по данным МЧС РФ от 20 до 25% от общего числа пожаров по стране.

В АлтГТУ им. И. И. Ползунова разработана методика расчета абсолютных значений показателей пожарной опасности зданий и объектов АПК, на основе которых вычисляются интегральные показатели пожарной опасности электроустановок. Однако такие показатели не отражают вклад в уровень пожарной опасности со стороны КЗ, так как различные сети характеризуются различными совокупностями влияющих факторов, и, прежде всего, разными вероятностями возникновения КЗ. Поэтому количественная оценка может использоваться только в рамках одного объекта при сравнении эффективности вариантов защиты.

Оценка эффективности действия аппарата электрической защиты производится на основе совместного рассмотрения характеристики перегоя провода участка сети и характеристики срабатывания аппарата, осуществляющего защиту этого участка, в диапазоне возникающих токов КЗ.

При дуговом КЗ на участке сети наибольшую пожарную опасность представляет та его часть, для которой время перегоя провода меньше времени срабатывания аппарата защиты. При КЗ в этой части защита не уменьшает длительность процесса перегоя и, следовательно, не влияет на это явление и на весь дальнейший процесс развития пожара. Естественно считать, что, чем

больше длина этой части участка (или отношение его длины ко всей длине участка), тем выше пожарная опасность участка сети. На основании «картины», которую описывает данное положение, были сформированы так называемые показатели пожарной опасности сети по ее участкам.

Коэффициент незащищенности участка электрической сети определяется отношением диапазона токов КЗ, для которого время перегоя меньше времени срабатывания защиты, к диапазону токов КЗ на участке сети, т.е. представляет собой долю незащищенной части участка сети:

$$k_s^{нз(i)} = \delta I_s^{npz(i)} = \frac{l_s^{npz(i)}}{l_s},$$

где  $\delta I_s^{npz(i)}$  - доля незащищенной части участка сети для i-го вида КЗ;

$l_s$  - длина s-го участка сети (s=1, 2..., S);

$l_s^{npz(i)}$  - длина зоны перегоя для i-го вида КЗ на этом участке.

Нулевое значение отвечает отсутствию опасности перегоя на участке сети (и, как следствие, значительно меньшей опасности пожара, чем при наличии зоны перегоя, так как процесс развития КЗ ограничивается электрической защитой), а единичное – полной незащищенности участка сети от перегоя. Очевидно, что, чем меньше величина такого показателя, при прочих равных условиях, тем меньшую пожарную опасность представляет данный вид КЗ на этом участке, и, соответственно, тем лучше он защищен.

На основе этого показателя строится показатель, характеризующий пожарную опасность перегоя в сети в целом (и, соответ-

венно - эффективность системы электрической защиты) для *i*-го вида КЗ. Он определяется, как отношение суммы длин зон пережога к сумме длин всех участков сети и называется коэффициентом незащищенности сети для *i*-го вида КЗ:

$$K^{Hz(i)} = \Delta I^{npz(i)} = \frac{\sum_{s=1}^S l_s^{npz(i)}}{\sum_{s=1}^S l_s},$$

где,  $\Delta I^{npz(i)}$  - доля незащищенной части электрической сети для *i*-го вида КЗ;

$l_s^{npz(i)}$  - длина незащищенной части *s*-го участка сети.

С учетом рассмотренных показателей формируется показатель  $P_{s,T}^{Ki}(\Pi)$  пожарной опасности *i*-го вида КЗ на *s*-ом участке электрической сети:

$$P_{s,T}^{Ki}(\Pi) = P_{s,T}^{Ki} k_s^{Hz(i)},$$

где  $P_{s,T}^{Ki}$  - вероятность возникновения *i*-го вида КЗ на *s*-ом участке сети в течение времени *T*.

Используя коэффициент незащищенности электрической сети, можно определить показатель пожарной опасности *i*-го вида КЗ для всей электрической сети рассматриваемого объекта по формуле:

$$P_T^{Ki}(\Pi) = P_T^{Ki} K^{Hz(i)},$$

где  $P_T^{Ki}$  - вероятность возникновения *i*-го вида КЗ в электрической сети в течение времени *T*.

С учетом введенных показателей интегральный показатель пожарной опасности всех видов КЗ в электрической сети может быть рассчитан по формуле:

$$P_{\Sigma}^K(\Pi) = 1 - [1 - P_T^{K1}(\Pi)] \cdot [1 - P_T^{K2}(\Pi)] \times [1 - P_T^{K3}(\Pi)] \cdot [1 - P_T^{KK}(\Pi)],$$

где  $[1 - P_T^{Ki}(\Pi)]$  - вероятность отсутствия пережога проводов при КЗ *i*-го вида;

$P_T^{KK}(\Pi)$  - показатель пожарной опасности КЗ на корпус.

Если сеть защищена УЗО, используется следующая формула:

$$P_{\Sigma}^K(\Pi) = 1 - [1 - P_T^{K1}(\Pi)] \cdot [1 - P_T^{K2}(\Pi)] \times [1 - P_T^{K3}(\Pi)]$$

Вероятность возникновения *i*-го вида КЗ уникальна для каждого объекта и рассчитать ее не представляется возможным в связи с большим количеством влияющих факторов. Ранее нами было принято положение о распределении вероятностей возникновения замыкания по видам КЗ в соответствии со статистическими данными. Мы приняли допущение, что такая вероятность была одинаковой для разных объектов.

В связи с этим по абсолютным значениям показателей пожарной опасности, рассчитанным для различных объектов, нельзя делать вывод о большей или меньшей степени пожарной опасности КЗ. Поэтому количественная оценка может использоваться только в рамках одного объекта при сравнении эффективности вариантов защиты.

Для сравнительной оценки пожарной опасности на различных объектах могут использоваться приведенные интегральные показатели, рассчитанные при известных и в общем случае различных значениях вероятности КЗ на рассматриваемых объектах.

В рамках нашей модели будем рассматривать вероятность возникновения КЗ на объекте в целом как сумму возникновения вероятностей на его участках.

Рассмотрим сеть некоторого произвольного объекта. Для которого  $P_3$  – вероятность возникновения короткого замыкания для сети объекта в целом.

Разобьем сеть объекта на *n* участков. В этом случае вероятность возникновения замыкания будет складываться из вероятностей возникновения замыкания на каждом участке и определяться по формуле:

$$P_3 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{3i}),$$

где *n* – количество участков разбиения сети;

$p_{3i}$  – вероятность возникновения замыкания на *i*-м участке;

$(1 - p_3)$  – вероятность незамыкания (вероятность отсутствия возникновения КЗ) на отдельном дискретном участке;

$\prod_{i=1}^n (1 - p_{3i})$  – вероятность незамыкания для объекта в целом.

Если выделить участки объекта таким образом, чтобы вероятности возникновения короткого замыкания на каждом участке были равны и равны  $p_3$ , то вероятность возникновения замыкания на объекте в целом будет определяться по формуле:

$$P_3 = 1 - (1 - p_3)^n,$$

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрим вероятность возникновения замыкания для участка сети. Она будет зависеть от большого количества факторов: состояния изоляции (сопротивления, степени увлажнения, степени старения), от условий эксплуатации сети (перегрузки, перенапряжение, повышенные токи утечки, механические воздействия), от условий окружающей среды (температура, влажность воздуха, наличие агрессивных сред) и т.д.

Влияние этих факторов отличается не только для разных объектов, но и для отдельных участков в рамках одного объекта. Кроме того, точное определение большинства перечисленных факторов на настоящий момент не представляется возможным технически. В связи с этим для сравнения показателей пожарной опасности различных объектов целесообразно перейти от точного определения вероятности замыкания к определению обобщенного показателя состояния изоляции, характеризующего вероятность отсутствия замыкания на объекте, и зависящего только от состояния изоляции.

Состояние изоляции оценивается с помощью следующих показателей: сопротивление изоляции  $R_{из}$ , коэффициент абсорбции  $K_{абс}$  и коэффициент поляризации  $K_{пол}$ .

Сопротивление изоляции постоянному току является основным показателем состояния изоляции. Сопротивление изоляции определяется величиной тока прямой проводимости и должно измеряться через некоторое время после приложения напряжения, достаточного для завершения процессов поляризации. В соответствии с [2] сопротивление цепи напряжением до 500 В должно составлять:  $R_{из} \geq 0,5$  МОм.

Ток абсорбции обусловлен процессом зарядки абсорбционной емкости, образуемой в толще изоляции неоднородностями изоляционного материала, а также различными включениями, например, в виде влаги и загрязнений.

Коэффициент абсорбции рассчитывается, как отношение сопротивления изоляции, измеренного через 60 с после приложения напряжения к сопротивлению изоляции, измеренному через 15 с после приложения напряжения [3, 4]. Для неувлажненной изоляции при температуре 10-30 °С  $K_{абс} = 1,3 - 2,0$ . Для увлажненной изоляции он близок к единице.

Ток поляризации обусловлен процессом движения сильно замедленных диполей, связанного с изменением структуры диэлектрика. Коэффициент поляризации показывает способность заряженных частиц и диполей

перемещаться под действием электрического поля, что определяет степень старения изоляции. Этот коэффициент рассчитывается, как отношение сопротивления изоляции, измеренного через 600 с после приложения напряжения к сопротивлению изоляции, измеренному через 60 с после приложения напряжения [2, 3, 6].

Если  $K_{пол} < 1$ , то изоляция неисправна, если  $K_{пол} > 4$  - изоляция является качественной.

Так как обобщенный показатель состояния изоляции должен характеризовать вероятность замыкания на объекте, то он должен описываться теми же выражениями, что и вероятность КЗ на объекте:

$$\Omega_C = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \omega_{Ci}),$$

где  $n$  – количество участков разбиения сети;

$\Omega_C$  – обобщенный показатель состояния изоляции.

$\omega_{Ci}$  – индивидуальный показатель состояния изоляции на  $i$ -м участке характеризующий вероятность возникновения замыкания.

Рассмотрим участок сети, который будет характеризоваться одинаковыми параметрами качества изоляции. Разобьем этот участок на  $n$  одинаковых частей, в этом случае  $\omega_{Ci}$  будут равны между собой и сопротивление изоляции каждого участка  $r_{изi}$  также будут равны для всех участков.

Обобщенный показатель состояния изоляции в таком случае будет определяться по формуле:

$$\Omega_C = 1 - (1 - \omega_C)^n,$$

где  $n$  – число разбиений.

В результате разбиения участка на части можно представить, что общее сопротивление его изоляции ( $R_{из}$ ) будет складываться из сопротивлений изоляции его частей ( $r_{из}$ ) включенных параллельно. В этом случае сопротивление изоляции части определяется по формуле:

$$r_{из} = n \cdot R_{из}$$

Выражаем  $n$ :

$$n = \frac{r_{из}}{R_{из}}$$

Рассмотрим показатель состояния изоляции одной такой части. Вероятность возникновения замыкания части тем меньше чем сопротивление выше такой же характер имеет и показатель состояния изоляции, однако характер такой зависимости оценить сложно, но любую зависимость можно представить в

виде полинома и следовательно справедливо выражение:

$$\omega_C \sim \frac{1}{(a_0 r_{из}^m + a_1 r_{из}^{m-1} + \dots + a_m r_{из}^0)}$$

Коэффициент абсорбции  $K_{абс}$  и коэффициент поляризации  $K_{пол}$  показывают изменение сопротивления изоляции вследствие его увлажнения и старения, т.е. характеризуют как изменяется сопротивление изоляции в результате протекания постоянного тока по сравнению с моментом начала отсчета. Соответственно чем больше изменение сопротивления изоляции, тем хуже изоляция работает при переменном напряжении и соответственно справедливо:

$$\omega_C \sim \frac{1}{\left( a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + a_1 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^{m-1} + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0 \right)}$$

Так как в модели производится анализ только трех факторов, то влияние всех прочих факторов можно представить в виде постоянной (С), соответственно:

$$\omega_C = \frac{C}{\left( a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0 \right)}$$

Тогда обобщенный показатель состояния изоляции будет рассчитываться по формуле:

$$\Omega_C = 1 - \left( 1 - \frac{C}{\left( a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0 \right)} \right)^{\frac{r_{из}}{R_{из}}}$$

Вынесем  $r_{из}^m$ :

$$\Omega_C = 1 - \left( 1 - \frac{C}{r_{из}^m \left( \frac{a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0}{r_{из}^m} \right)} \right)^{\frac{r_{из}}{R_{из}}}$$

Произведем замену  $r_{из} = x$ , получим:

$$\Omega_C = 1 - \left( 1 + \frac{C}{x \cdot r_{из}^{m-1} \left( \frac{a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0}{r_{из}^m} \right)} \right)^{\frac{x}{R_{из}}}$$

$$\Omega_C = 1 - \frac{1}{\left( 1 + \frac{C}{x \cdot r_{из}^{m-1} \left( \frac{a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0}{r_{из}^m} \right)} \right)^{\frac{x}{R_{из}}}}$$

При увеличении числа разбиений до бесконечности сопротивление части  $r_{из}$  будет стремиться к бесконечности, следовательно  $x$  также будет стремиться к бесконечности, а величина  $\left( 1 + \frac{1}{x} \right)^x$ , при  $x$  стремящемся к бесконечности, является первым замечательным

30

пределом и равняется  $e$ . Предел отношения

полиномов  $\frac{a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0}{r_{из}^m}$  при  $r_{из}$

стремящемся к бесконечности будет определяться отношением коэффициентов старших степеней, следовательно

$\frac{a_0 \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^m + \dots + a_m \left( \frac{r_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}} \right)^0}{r_{из}^m} = \frac{a_0}{K_{абс} \cdot K_{пол}}$ . Произведем замену  $\frac{C}{a_0} = A$ .

В этом случае получаем:

$$\Omega_C = 1 - \frac{1}{R_{из} \sqrt[e]{\frac{A \cdot K_{абс} \cdot K_{пол}}{r_{из}^{m-1}}}}$$

В связи с тем что вероятность замыкания для объекта не должна зависеть от способа рассмотрения, т.е. от способа дискретизации объекта (насколько малыми выбираются рассматриваемые части), следовательно  $\Omega_C$  не должна зависеть от  $r_{из}$ , а следовательно значение  $r_{из}^{m-1}$  должно быть константой и значит  $m = 1$ . Получим:

$$\Omega_C = 1 - \frac{1}{R_{из} \sqrt[e]{A \cdot K_{абс} \cdot K_{пол}}}$$

В результате получили зависимость показателя состояния изоляции, характеризующего вероятность замыкания на объекте, от состояния изоляции, характеризуемого сопротивлением изоляции  $R_{из}$ , коэффициентом абсорбции  $K_{абс}$  и коэффициентом поляризации  $K_{пол}$  и постоянной А.

Определим значение коэффициента А:

$$A = \ln \left( \frac{1}{1 - \Omega_C} \right) \cdot \frac{R_{из}}{K_{абс} \cdot K_{пол}}$$

Воспользуемся статистическими данными о вероятности возникновения пожара в течении года [5]. Примем допущение что доля пожаров по причинам КЗ на всех объектах одинакова.

Результаты расчетов показателей приведены в таблице 1

Для расчета показателя состояния изоляции примем значение постоянной А равно среднему расчетному значению равному 0,001028.

Для сопоставления показателей пожарной опасности различных объектов введем понятие: «Объект приведения по уровню изоляции» (далее ОПИ), под которым понимается гипотетический объект электроснабжения, характеризуемый среднестатистическими значениями вероятностей КЗ, одинаковыми для каждого участка электрической сети и равными: однофазного - 0,03; двухфазного - 0,04; трехфазного - 0,015; однофазного КЗ на

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

корпус - 0,2. Показатели состояния изоляции также одинаковы для всех участков электрической сети объекта и имеют следующие

значения  $K_{абс} = 1,5$ ;  $K_{пол} = 3$ ;  $R_{из} = 0,2$  МОм.

Таблица 1 - Показатели характеризующие состояние изоляции и протяженности сети

Наименование общественного учреждения	Показатели состояния			Вероятность возникновения пожара *10 <sup>-3</sup>	Значение постоянной А для объекта
	$K_{абс}$	$K_{пол}$	$R_{из}$		
Дошкольные	1,55	1,2	0,216	7,34	0,000856
Общеобразовательные	1,47	1,7	0,199	11,6	0,000929
Начального профессионального образования	1,48	1,38	0,105	19,8	0,001028
Среднего профессионального образования	1,58	1,18	0,081	26,9	0,001185
Высшего профессионального образования	1,39	2,2	0,029	139,8	0,001428
Больница	1,3	2	0,09	36,6	0,001291
Санаторий	1,3	1,15	0,069	29,9	0,001401
Амбулатория	1,4	2,13	0,248	8,88	0,000742
Предприятия розничной торговли	1,36	3,18	0,158	20,3	0,000749
Предприятия общественного питания	1,36	2,93	0,103	38,8	0,001023
Гостиницы	1,43	2,15	0,1	28,1	0,000927
Библиотеки	1,15	1,24	1,06	1,16	0,000863
Музеи	1,36	2,45	0,185	13,8	0,000772
Театры	1,56	2,34	0,043	96,6	0,001197

Рассчитаем значение показателя  $\Omega_c$  для Объекта приведения по уровню изоляции, обозначенное, как  $\Omega_{c0}$ :

$$\Omega_{c0} = 1 - \frac{1}{\sqrt[0,2]{e^{0,001028 \cdot 1,5 \cdot 3}}} = 0,022865$$

Полученное значение соответствует всем участкам электропроводки ОПИ.

Для сопоставления показателей пожарной опасности любого расчетного объекта с соответствующими показателями ОПИ, необходимо определить значение  $\Omega_{ci}$  для каждого участка электрической сети рассматриваемого объекта и произвести корректировку значений вероятности КЗ каждого вида КЗ по формуле:

$$P_{T_{cp}}^{Ki} = \frac{\Omega_{ci} \cdot P_{T_{cp}}^{Ki}}{\Omega_{c0}}$$

где  $P_{T_{cp}}^{Ki}$  - среднестатистическое значение вероятности данного вида КЗ для ОПИ.

Далее производится расчет приведенных интегральных показателей пожарной опасности КЗ для рассматриваемого объекта с использованием скорректированных значений вероятностей КЗ каждого вида по участкам электрической сети.

Измерение показателей состояния изоляции можно производить с помощью прибо-

ра MIC-1000 [86]. Однако, на практике достаточно сложно определить эти показатели для каждого участка электрической сети. Это связано, в частности, с тем, что в большинстве случаев невозможно в процессе измерения исключить все связи фазных проводов с нулевыми проводами и сторонними проводящими частями через однофазную нагрузку.

Поэтому возможно использование упрощенного метода корректировки расчетного значения вероятностей КЗ на рассматриваемом объекте.

Примем допущение, что качество изоляции на рассматриваемом объекте одинаково для всех участков электрической сети и соответствует уровню изоляции на выбранном для контроля участке.

На данном участке производится измерение параметров  $K_{абс}$ ,  $K_{пол}$ ,  $R_{из}$ , характеризующих качество изоляции.

Далее производится оценка  $\Omega_c$  для всей электропроводки рассматриваемого объекта.

Пусть измеренные показатели состояния изоляции для рассматриваемого объекта имеют следующие значения:

$$K_{абс} = 1,6; K_{пол} = 3,2; R_{из} = 1,0 \text{ МОм.}$$

В этом случае:

$$\Omega_c = 1 - \frac{1}{\sqrt[3]{e^{0,001028 \cdot 1,6 \cdot 3,2}}} = 0,00525$$

Тогда приведенные значения интегральных показателей пожарной опасности КЗ рассматриваемого объекта могут быть рассчитаны по уменьшенным в 4,36 раза (отношение  $\Omega_{c0}$  к  $\Omega_c$ ) среднестатистическим значениям вероятностей КЗ.

Рассчитанные таким образом значения приведенных интегральных показателей могут использоваться для сравнительной оценки пожарной опасности различных объектов или их групп, выделяемых по функциональным или территориальным признакам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обстановка с пожарами в Российской Федерации за 2009 год // Пожарная безопасность. 2010.- № 2.
2. ГОСТ Р 50571.16-99(МЭК60364-6-61-86). Электроустановки зданий. Часть 6. Испытания. Глава 61.Приемо-складочные испытания.

3. Мотуско Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках/Ф.Я. Мотуско.- М.: Энергия, 1973 – 200 с.

4. Забарский, Б.М. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики/ С.Е. Васильев, Б.М. Забарский, Е.И. Забокрицкий, Б.А. Холодовский.- Киев: Наукова-думка,1972. – 624 с.

5. Статистические данные о вероятности возникновения пожара для некоторых общественных зданий различного назначения [Электронный ресурс]. - Электрон.текст.дан. – Режим доступа: <http://www.pogaranet.ru/qa/485.html> Загл. С экрана.

6. Измерение параметров изоляции [Электронный ресурс]. - Электрон.текст.дан. – Режим доступа: [http://www.sonel.ru/ru/biblio/measurement/measurement\\_mic/](http://www.sonel.ru/ru/biblio/measurement/measurement_mic/) Загл. с экрана.

**Компанеец Борис Сергеевич**, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, к.т.н., старш. преподаватель, E-mail: [drolnik@list.ru](mailto:drolnik@list.ru).

**Нефёдов Сергей Федорович**, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, к.т.н., зав. лабораториями каф. ЭПБ, E-mail: [nfdv@inbox.ru](mailto:nfdv@inbox.ru).