

# МЕТОД ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СРОК СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ 6 (10) кВ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А.В. Коржов

На примере ретроспективных статистических данных о потоке отказов кабельных линий 6 (10) кВ городских электрических сетей по Нефтекамску и Челябинску показана необходимость оценки значимости влияния не только режимных параметров, но и проектных и эксплуатационных факторов, принятых обслуживающим персоналом. Предложены метод оценки значимости данных факторов, алгоритм подготовки и сбора ретроспективных данных для проведения статистического анализа. Метод реализован с применением дисперсионного анализа, целью которого является исследование различий для рассматриваемых групп факторов. По результатам исследования и апробации метода были определены вероятные значимые сопутствующие к режимным параметрам факторы, влияющие на ресурс, например, связанные с глубиной и траекторией прокладки кабеля, а также местоположением кабеля в структуре схемы фидера в распределительной городской кабельной сети.

*Ключевые слова:* кабель, изоляция, ретроспективная статистика, городские электрические сети.

## Введение

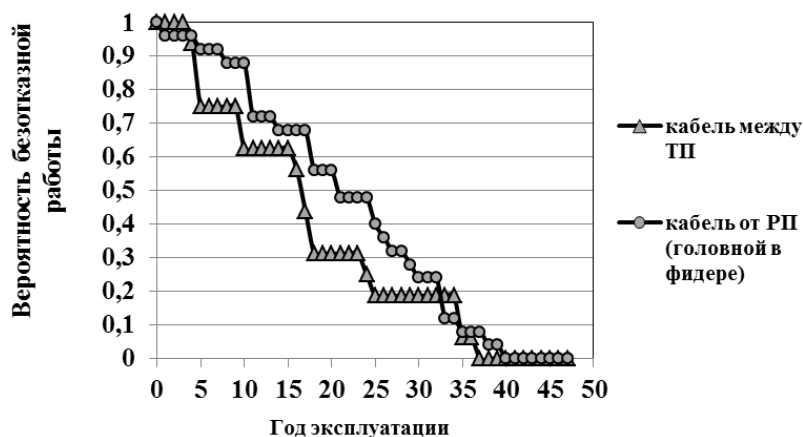
Проведенный автором сбор и анализ статистической информации о потоке отказов силовых кабелей 6 (10) кВ по Нефтекамску и Челябинску показал, что пробои изоляции наблюдаются в период до достижения гарантированного заводами изготовителями срока службы (как правило, 30 лет). Так, например, на рисунке приведены полученные нами эмпирические функции безотказной работы головных кабелей (КЛ) и кабелей, находящихся ниже по схеме фидера. Расчет проведен для кабелей марки АСБ, выборка 44 года. Данный факт показывает, что в условиях эксплуатации на срок службы кабеля оказывают влияние сопутствующие проектные и режимные решения, которые в комбинации с электромагнитными и тепловыми процессами в изоляции могут приводить к условиям преждевременных пробоев изоляции.

## Метод оценки значимости факторов

Ранее в работах [1, 2] была апробирована методика проверки с помощью дисперсионного анализа статистической значимости различий между средними значениями срока службы изоляции для групп воздействующих факторов: глубина и траектория прокладки, пересечение с объектами городских коммуникаций. Уточненный расчет полученных ранее выводов с учетом пополнения статистических ретроспективных данных за период до 2013 г. позволил сформулировать следующий метод оценки значимости факторов. Метод был апробирован в городских электрических сетях Нефтекамска и Челябинска.

Метод оценки можно представить следующим алгоритмом:

1. Составляется матрица, характеризующая каждый пробой изоляции кабеля по группе факто-



Функции безотказной работы головных кабелей и кабелей, находящихся ниже по схеме фидера

ров, табл. 1. Чем больше критериев характеризуют пробой изоляции, тем более точно проводится отсеивание малозначимых факторов. Необходимо охарактеризовать по результатам разбора каждый пробой изоляции по таким критериям, как, например: пробой на повороте, на прямой; пробой рядом с городской коммуникацией (теплотрасса, газопровод и т. п.); пробой рядом с дорогой; пробой головного кабеля; пробой кабеля между ТП; пробой кабеля с максимально допустимой нагрузкой; пробой при определенных климатических параметрах; пробой после высоковольтных диагностических испытаний; пробой после режима короткого замыкания (КЗ); пробой по причине старения, коррозии, сопутствующих режимных факторов и т. д.

2. По каждому пробую указывается срок наработки до отказа. По формулам (1), (2) и с использованием схемы дисперсионного анализа (табл. 2) находятся групповая и межгрупповая средние квадраты.

Метод, позволяющий осуществить анализ влияния выделенных факторов и их взаимодействие на срок службы кабеля, был реализован с применением дисперсионного анализа [3], целью которого является исследование различий для рассматриваемых групп факторов.

При разработке использовались основные предпосылки:

а) срок службы кабеля имеет вид:

$$T_{jl} = a_j + \varepsilon_{jl}, \quad j = 1, 2, 3; \quad l = 1, \dots, n,$$

где  $a_j$  – эффект, получаемый под влиянием  $j$ -го уровня фактора;  $\varepsilon_{jl}$  – случайная величина (возмущение), вызванная влиянием неконтролируемых факторов;

б) дисперсия возмущения, постоянная для любых  $j, l$ , т. е.  $D(\varepsilon_{jl}) = \sigma^2$ ;

в) возмущение имеет нормальный закон распределения  $N(0; \sigma^2)$ .

Основная идея дисперсионного анализа заключается в том, что общая вариация срока службы кабеля складывается из двух компонент, характеризующих изменчивость этого показателя между выделенными факторами и изменчивость «внутри» фактора, характеризующих одинаковую для всех факторов вариацию под влиянием неучтенных факторов.

Схема дисперсионного анализа представлена в виде табл. 2 [3]. Здесь

$$\bar{T}_{i*} = \sum_{j=1}^n T_{ij} / n \quad (1)$$

– групповая средняя для  $i$ -го уровня фактора;  $T_{ij}$  – соответствующие значения срока службы кабеля до пробоя (в месяцах),  $i = 1, 2$ ;  $n$  – количество рассмотренных кабелей для выделенных групп фактора;

$$\bar{T}_{**} = \sum_{i=1}^m \bar{T}_{i*} / m \quad (2)$$

– общая средняя.

Средний квадрат  $S_1^2$  является несмещенной оценкой межгрупповой дисперсии, а  $S_2^2$  – несмещенной оценкой внутригрупповой дисперсии.

3. Вычисляются фактическое и критическое значения статистики, сравнение которых подтверждает или опровергает гипотезу о влиянии факторов на срок службы кабеля.

Нулевая гипотеза принимается, если

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \leq F_{\alpha; k_1; k_2} \quad \text{на уровне значимости } \alpha.$$

Таблица 1

Матрица подготовки данных о пробоях кабелей для выявления значимых влияющих факторов

Номер пробоя по типам кабелей	Параметры, характеризующие пробой изоляции кабеля												
	Проектные факторы				Эксплуатационные факторы				Режимные факторы				
	1	2	...	$i$	1	2	...	$i$	1	2	...	$i$	
1		$T_1$				$T_1$							$T_1$
2	$T_2$												
...													
$j$						$T_j$							

Таблица 2

Схема дисперсионного анализа

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат
Межгрупповая	$Q_1 = n \sum_{i=1}^m (\bar{T}_{i*} - \bar{T}_{**})^2$	$m - 1$	$S_1^2 = \frac{Q_1}{m - 1}$
Внутригрупповая	$Q_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_{i*})^2$	$mn - m$	$S_2^2 = \frac{Q_2}{mn - m}$
Общая	$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_{**})^2$	$mn - 1$	

Таблица 3

Влияние факторов на срок службы силовых кабелей 6 (10) кВ по анализируемым городским электрическим сетям

Факторы	$k_1$	$k_2$	$S_1^2$	$S_2^2$	$F$	$F_{\alpha; k_1; k_2}$	Оказывает влияние
Глубина прокладки	1	154	97 369	35 051,87	2,77	3,84	Нет
Траектория прокладки	1	140	5719,17	51 765,1	0,11	254	Нет
Пересечение с объектами	2	135	86 002,5	52 862,82	1,62	3,0	Нет
Сравнение попарно выделенных факторов							
Глубина и траектория прокладки	1	360	73 818,46	23 884,25	3,09	3,84	Нет
Глубина прокладки и пересечение с объектами	1	360	117 646,5	28 248,1	4,17	3,0	Да
Траектория прокладки и пересечение с объектами	1	550	76,19	25 674,6	0,003	254	Нет
Глубина, траектория и пересечение с объектами	2	540	80 143,91	21 763,63	3,68	3,0	Да

Пример апробации использования предложенного метода оценки приведен в табл. 3. В примере оценивалось влияние на пробой изоляции таких факторов, как глубина прокладки, траектория прокладки (состоящая из двух уровней фактора: прямая и поворот) и пересечения с объектами (три уровня фактора: пересечение с коммуникациями, нет пересечения и пересечение с дорогой).

Рассматривая попарно выделенные факторы и взаимосвязь трех факторов для всех рассмотренных кабелей, получен следующий результат: существенное влияние на срок службы кабеля имеют глубина прокладки и пересечение с объектами, а также глубина, траектория и пересечение с объектами в совокупности по проанализированным кабельным сетям.

#### Заключение

1. Ресурс изоляции силовых кабелей 6 (10) кВ в условиях эксплуатации зависит как от режимных параметров, так и от сопутствующих принятых персоналом проектных и режимных решений. По статистике потока отказов кабельных линий у обслуживающего персонала появляется возможность использования статистических методов оценки значимости данных факторов и выработки решений по их оптимизации.

2. На основе предложенного метода по результатам статистических данных по Нефтекамску и Челябинску, например, установлено, что значимое влияние на поток отказов КЛ влияют: 1) глубина прокладки и пересечение с объектами, а также глубина, траектория и пересечения с объектами в совокупности; 2) местоположение силового кабеля 6 (10) кВ в структуре схемы фидера (см. рисунок) и принятые уставки релейной защиты и автоматики.

#### Литература

1. Коржов, А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6 (10) кВ городских электрических сетей: моногр. / А.В. Коржов, А.И. Сидоров. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 252 с.

2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский // Электрические станции. – 2008. – № 8. – С. 40–47.

3. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для студентов вузов, обучающихся по экон. специальностям / Н.Ш. Кремер. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 551 с.

**Коржов Антон Вениаминович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679246, e-mail: AVK1978@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 октября 2013 г.

## **ASSESSMENT METHOD APPLIED TO THE SIGNIFICANCE OF DESIGN AND OPERATIONAL FACTOR INFLUENCE ON THE SERVICE LIFE OF 6 (10) kV POWER CABLE INSULATION IN URBAN NETWORKS**

*A.V. Korzhov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
ABK1978@mail.ru*

The article deals with retrospective statistical data on failure intensity of 6 (10) kV cable lines in Neftekamsk and Chelyabinsk urban networks to show the necessity of assessment of the significance not only of regime parameters, but also of the design and operational factors accepted by the service personnel. We propose the method of assessment of the significance of these factors and algorithm of preparation and collection retrospective data for carrying out the statistical analysis. The method is implemented with the use of analysis of variance which is aimed to research the distinctions for considered groups of factors. Based on the results of research and method testing we defined the probable significant factors accompanying to regime parameters affecting the service life, for example, related to the depth and trajectory of the cable as well as the location of the cable in structure of the feeder scheme in the city distribution cable network.

*Keywords: cable, insulation, retrospective statistics, urban networks.*

### **References**

1. Korzhov A.V., Sidorov A.I. *Metody i modeli otsenki sostoyaniya izolyatsii i elektrobezopasnosti kabel'nykh liniy 6 (10) kV gorodskikh elektricheskikh setey* [Methods and Models of Estimation of Insulation and Electro Safety Conditions of 6 (10) kV Cables of City Cable Lines]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2009. 252 p.
2. Korzhov A.V., Sidorov A.I., Yurchenko E.Yu., Nikolaevskij A.B. [Mathematical Model of Damage to the Insulation of Power Cable Lines in Urban Networks]. *Ehlektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2008, no.8, pp. 40–47. (in Russ.)
3. Kremer N. Sh. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, 2007. 551 p.

*Received 3 October 2013*