

УДК 621.315.1

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Ю.Д. КУРЧАТОВА, студент гр. АЭБ-201 (Кузбасский государственный  
технический университет имени Т.Ф. Горбачева)

Н.А. КУРЧАТОВ, главный специалист (филиал ПАО «Россети Сибирь» –  
«Кузбассэнерго-РЭС»)

Научный руководитель: ЗАХАРОВА А. Г. профессор, д.т.н  
(Кузбасский государственный технический университет имени

Т.Ф.Горбачева)  
г. Кемерово

Рассматривается использование теории подобия и моделирования для оценки надежности воздушных линий электропередач (ВЛ) и их устойчивости воздействию погодным условиям. Методом анализа размерностей определены детерминированные критерии подобия, получена критериальная модель ВЛ при воздействии воздушных ветровых нагрузок при различных температурах. Полученные критерии подобия дают возможность построить стохастическую модель для оценки надежности ВЛ на основе собранных статистических данных.

**Ключевые слова:** теория подобия, теория надежности, воздушные линии электропередач, ветровая нагрузка, метод анализа размерностей.

### **Постановка проблемы**

Согласно исследованию [1] 66 % технологических нарушений (ТН) в энергосистеме Кузбасса происходит на воздушных линиях электропередач (ВЛ). Из них 31,53 % произошли по причине обрыва провода, в том числе 18,42 % ТН во время непогоды. Наиболее частой причиной обрыва является обрыв провода под воздействием гололедных и ветровых нагрузок.

Данные технологические нарушения ведут к нарушению электроснабжения значительного числа потребителей. При этом время на поиск и устранение из-за большой протяженности ВЛ и низкого уровня оснащения средствами сбора и передачи информации (наблюдаемости) достаточно велико. Все это приводит к экономическому ущербу как энергосетевых компаний, так и потребителей.

Повышение наблюдаемости и применение инновационных средств автоматизации снижает время, необходимое на поиск места ТН, а также продолжительность недоотпуска электроэнергии потребителям. Однако,

борьба со следствием недостаточно эффективна без борьбы с причинами технологических нарушений.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей необходимо выявление оборудования, исчерпавшего ресурс и подлежащего замене.

### **Пути решения**

Диагностика ВЛ, включающая в себя визуальный и инструментальный анализ, дает точные представления о состоянии ВЛ, однако требует привлечения дорогостоящих специалистов и оборудования [2]. Кроме того, качественный инструментальный анализ занимает достаточно много времени.

В такой ситуации целесообразно применение методов моделирования для определения потенциально самых проблемных участков сети. Это позволит эффективно распределить ресурсы.

В [3–5] показано применение теории подобия для инженерных задач в условиях отсутствия возможности непосредственного измерения параметров системы, или когда таковое затруднено и ограничено. Рассматриваемая проблема относится к такого рода задачам.

Используя приведенные в [3] методы, можно взять в качестве модели наиболее доступные для измерений ВЛ, а зависимости, полученные по собранным с них данным, распространить на линии, ненаблюдаемые в полной мере.

### **Построение модели и определение критериев подобия**

Условием обрыва провода является превышение действующих нагрузок предела прочности для материала провода.

Участок линии между опор можно представить в виде упругой нити  $l$ , натянутой между шарнирными опорами с пролётом  $D$ . Для большей практической применимости примем, что точки крепления находятся на разной высоте. Разницу высот обозначим как  $\Delta h$ .

На провод действуют его вес и гололедная нагрузка, которые можно представить, как давление  $q$ , равномерно распределенное по его длине, сила натяжения  $H$  и поперечные ветровые нагрузки  $W$ . Также необходимо учесть температуру окружающей среды  $t$  и нагрев от протекающего тока  $i$ .

Поскольку данную модель невозможно представить в одном измерении длин, представим размерность  $L$  в качестве векторной величины по трём осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , направив их соответственно горизонтально вдоль пролёта, горизонтально перпендикулярно ему и вертикально.

Схема модели приведена на рисунке 1.

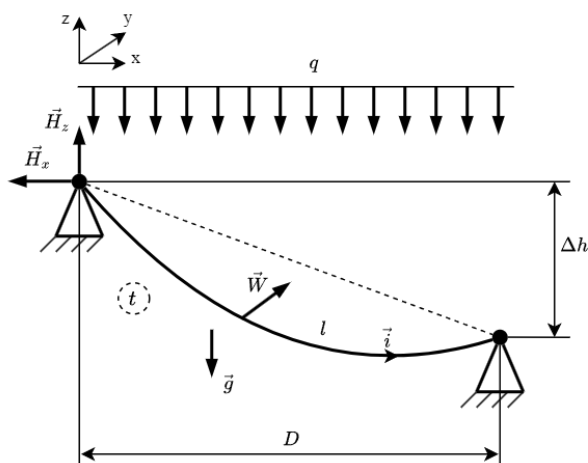


Рисунок 1 – Модель провода между опор

Таким образом, для указанных воздействий определим действующие параметры модели в системе размерностей  $L_x L_y L_z M T \theta I$ . Таким образом, число размерностей  $m = 7$ .

Ради удобства действующие параметры и их размерности сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Действующие параметры модели

№	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Размерность
1.	Площадь сечения провода	$A$	$\text{м}^2$	$L_x^0 L_y^1 L_z^1 M^0 T^0 \theta^0 I^0$
2.	Удельный вес провода	$q$	$\text{Н/м}$	$L_x^{-1} L_y^0 L_z^1 M^1 T^{-2} \theta^0 I^0$
3.	Модуль упругости провода	$E$	$\text{Н/м}^2$	$L_x^{-1} L_y^0 L_z^0 M^1 T^{-2} \theta^0 I^0$
4.	Удельное сопротивление провода	$r$	$\text{Ом}\cdot\text{м}$	$L_x^3 L_y^0 L_z^0 M^1 T^{-2} \theta^0 I^{-2}$
5.	Коэффициент температурного расширения	$\alpha$	$1/^\circ\text{C}$	$L_x^0 L_y^0 L_z^0 M^0 T^0 \theta^{-1} I^0$
6.	Ток	$I$	$\text{А}$	$L_x^0 L_y^0 L_z^0 M^0 T^0 \theta^0 I^1$
7.	Пролёт опор	$D$	$\text{м}$	$L_x^1 L_y^0 L_z^0 M^0 T^0 \theta^0 I^0$
8.	Разница высот опор	$\Delta h$	$\text{м}$	$L_x^0 L_y^0 L_z^1 M^0 T^0 \theta^0 I^0$
9.	Температура окружающей среды	$t$	$^\circ\text{C}$	$L_x^0 L_y^0 L_z^0 M^0 T^0 \theta^1 I^0$
10.	Ветровые нагрузки	$W$	$\text{Н}$	$L_x^0 L_y^1 L_z^0 M^1 T^{-2} \theta^0 I^0$
11.	Продольные нагрузки	$H_x$	$\text{Н}$	$L_x^1 L_y^0 L_z^0 M^1 T^{-2} \theta^0 I^0$
12.	Время	$\tau$	$\text{с}$	$L_x^0 L_y^0 L_z^0 M^0 T^1 \theta^0 I^0$

Как видно из таблицы  $n = 12$  – число параметров, входящих в модель. Тогда по  $\pi$ -теореме число независимых критериев подобия  $p = n - m = 5$ , каждый из которых можно представить как [6]:

$$\pi_k = \prod_{i=1}^n X_i^{z_{i,k}}, \quad k = \overline{1, p} \quad (1)$$

где  $X_i$  –  $i$ -тый параметр модели,  $z_{i,k}$  – степенной коэффициент  $k$ -того критерия подобия, определяемый из уравнения размерностей по методу полного одностороннего комплекса [7]:

$$[\pi_k] = \prod_{j=1}^m (\chi_j)^{\sum_{i=1}^n \gamma_{i,k} \cdot z_{i,k}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, p} \quad (2)$$

где  $\chi_j$  –  $j$ -ая размерность модели,  $\gamma_{i,k}$  – показатель  $j$ -ой размерности  $i$ -того параметра, представлены в таблице 2.

В качестве независимых величин взяты  $A, q, I, D, \Delta h, t, \tau$ .

Таблица 2 – Показатели размерностей параметров

Размер- ность	Параметр											
	$A$	$q$	$I$	$D$	$\Delta h$	$t$	$\tau$	$E$	$r$	$\alpha$	$W$	$H_x$
$L_x$	0	-1	0	1	0	0	0	-1	3	0	0	1
$L_y$	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$L_z$	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$M$	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
$T$	0	-2	0	0	0	0	1	2	-2	0	-2	-2
$\theta$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
$I$	0	0	1	0	0	0	0	0	-2	0	0	0

Решив (2) относительно независимых величин, получим степенные коэффициенты критериев подобия:

$$Z = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) определим независимые критерии подобия:

$$\pi_1 = \frac{E}{A \cdot \tau^4 \cdot q}; \pi_2 = \frac{I^2 \cdot r}{A \cdot D^4 \cdot q}; \pi_3 = \alpha \cdot t; \pi_4 = \frac{W \cdot \Delta h}{A^2 \cdot D \cdot q}; \pi_5 = \frac{H_x}{A \cdot D^2 \cdot q}; \quad (4)$$

Тогда критериальное уравнение модели:

$$\pi = f\left(\frac{E}{A \cdot \tau^4 \cdot q}, \frac{I^2 \cdot r}{A \cdot D^4 \cdot q}, \alpha \cdot t, \frac{W \cdot \Delta h}{A^2 \cdot D \cdot q}, \frac{H_x}{A \cdot D^2 \cdot q}\right) \quad (5)$$

Уравнение (5) содержит в себе как детерминированные ( $A, q, D, \Delta h, \tau$ ), так и стохастические величины ( $t, W, I$ ).

### Выводы

На основе теории подобия рассмотрено влияние воздействующих факторов на провод воздушной линии. Несмотря на то, что построение однозначной зависимости нагрузок от входных параметров невозможно, полученные критерии подобия, позволяющие в дальнейшем создать стохастическую модель нагрузок на ВЛ.

### Список литературы

1. Анализ аварийности в электрических сетях 6-110 кВ Кузбасской энергосистемы / С. А. Захаров, Д. С. Кудряшов, В. А. Бродт [и др.] // П Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения». – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Ecoprom/2017/egpp/pages/Articles/404.pdf> (дата обращения: 25.11.2023).
2. Диагностирование и мониторинг воздушных линий электропередач // Современные технологии производства: сайт. – URL: <https://extxe.com/21508/diagnostirovanie-i-monitoring-vozdushnyh-linij-jelektroperedach/> (дата обращения: 25.11.2023).
3. Осташкевич В. А. Теоретические основы стохастической теории подобия в задачах надежности и безопасности систем / В. А. Осташкевич // НиКа. – 2010.
4. Северцев Н. А. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий / Н. А. Северцев, А. Н. Дарьина // НиКа. – 2020.
5. Оценка стохастического подобия объектов со случайными параметрами сложных технических систем / А. В. Воловик, С. В. Ефименко, И. А. Клавдиев [и др.] // ГИАБ. – 2014. – № 6.
6. Крамаренко Н. В. Методы подобия в механике. Анализ размерностей: учебное пособие / Н. В. Крамаренко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 212 с.
7. Крамаренко Н. В. Способы вывода критериев в теории подобия / Н. В. Крамаренко, Л. О. Тягнирядно, Ю. В. Вшивкова // Наука Промышленность Оборона: труды XVII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / ред. С. Д. Саленко [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1. – С. 372.

Информация об авторах:

Курчатова Юлия Дмитриевна, студент гр. АЭБ-201, КузГТУ, 650000,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, kurchatovajud@yandex.ru

Курчатов Николай Александрович, главный специалист, Филиал ПАО  
«Россети Сибирь» – «Кузбассэнерго-РЭС», 650000, г. Кемерово, ул. Николая  
Островского, д. 11, kurchatov\_na@ke.rosseti-sib.ru

Захарова Алла Геннадьевна, д.т.н., профессор, КузГТУ, 650000,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, zaharovaag@kuzstu.ru