

УДК 621.316.9

## ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6-10 кВ

Л.Д. Сафрошкина, Ю.Р. Гунгер, В.А. Кандаев, Ю.В. Дёмин, Е.Г. Хромов, В.В. Зуйков

Новосибирская государственная академия водного транспорта. г. Новосибирск

E-mail: ngavt@ngs.ru

Определена несущая способность дефектных стоек опор воздушных линий 6-10 кВ. Рассчитана высота опор, до которой необходимо выполнить усиление. Предложены рекомендации по ремонту дефектных опор.

В энергетике РФ распределительные электрические сети 6-10 кВ являются самыми протяженными, их общая длина оценивается в 2 млн км. Перед энергетиками, эксплуатирующими распределительные сети 6-10 кВ, стоят две наиболее актуальные задачи – улучшение технического состояния существующих электрических сетей и повышение надёжности их работы.

Надёжность сетей 6-10 кВ в значительной степени определяется аварийностью воздушных линий (ВЛ) электропередачи.

Аварийность ВЛ 6-10 кВ в расчёте на 100 км линий составляет 6–7 аварий в год для районов с умеренным климатом и 20–30 аварий в год для районов со сложными климатическими и грунтовыми условиями (районы Крайнего Севера и Сибири). Число аварий из-за повреждения опор составляет 40 % от общего числа повреждений. Для сравнения, число аварий из-за повреждения изоляторов составляет 34 %, из-за повреждения проводов – 26 %. Следует также отметить, что аварийность ВЛ 6-10 кВ в РФ выше в 2–7 раз, чем в промышленно развитых странах [1–3].

Основные причины повреждений ВЛ 6-10 кВ систематизированы в монографии [1]:

Несущая способность дефектных опор и, следовательно, их аварийность зависят от вида дефектов.

Рассмотрим наиболее типичный вариант отказа в работе электросетевых конструкций, когда нагрузки не превышают расчетных значений, а дефектность, например, железобетонных опор обусловлена коррозией и циклами «замораживание-оттаивание» влаги в порах бетона.

При восстановлении несущей способности опор ВЛ 0,4-10 кВ и продления срока их службы необходимо решить целый комплекс вопросов: проанализировать состояние конструкций, классифицировать их по дефектности, рассчитать остаточную от первоначальной прочность конструкции для различных видов дефектности опор и определить зону конструкции, подлежащую усилению [1].

Массовые обследования состояния железобетонных электросетевых конструкций позволили классифицировать их по дефектности (табл. 1).

Методически для каждого вида дефектности конструкций определялось: наличие и характер дефектов (длина и ширина трещин), прочность бетона (методом пластических деформаций с помощью мо-

лотка Кашкарова и методом ультразвуковой диагностики с помощью дефектоскопа УК-10П), количество арматурных стержней и степень их аварийности поверочными расчетами по методу разрушающих нагрузок. На примере опор СВ105–3,5, эксплуатируемых в СНГ, рассмотрим методику оценки несущей способности дефектных опор ВЛ 10 кВ. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Характеристики опоры СВ105-3.5: класс бетона – В25 (М300); длина стойки 10,5 м; масса стойки – 1,18 т. Расчетные сопротивления: сжатия бетона – 148 кгс/см<sup>2</sup>; арматуры – 8300 кгс/см<sup>2</sup> (растяжение) и 5100 кгс/см<sup>2</sup> (сжатие).

В соответствии со СНиП 2.03.01-84 оценка несущей способности железобетонных конструкций производится по предельному состоянию 1-ой группы (расчет по прочности) и по предельному состоянию 2-ой группы (расчет по трещиностойкости).

### Расчет по прочности

Отсутствие аварийности конструкции подтверждается, если несущая способность элементов превышает не менее чем в 1,5 раза соответствующее усилие от внешней нагрузки.

**Таблица 1.** Классификация железобетонных опор ВЛ 10 кВ по дефектности (по данным [1], срок службы 5–20 лет)

Характеристика (виды дефектности)	1	2	3
Ширина раскрытия трещин, мм	< 0,5	0,5...1	> 1
Длина трещин, м	0,2...0,5	0,5...1	вдоль всей арматуры
Прочность бетона, кгс/см <sup>2</sup>	100...363	80...372	153...418
Коррозия арматуры, %	5...10	10...30	> 30

Работа железобетонных конструкций (ЖБК) при нагрузках (на растяжение и сжатие) оценивается с помощью коэффициентов  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{A_s \sigma_T}{bhR_b} \leq 0,3,$$

где  $b$  – ширина сечения;  $h$  – высота от границ до растянутой арматуры;  $R_b$  – призмочная прочность на сжатие (берется из фактических данных по обследованию);  $A_s$  – площадь сечения арматуры с учетом коррозии (для арматуры 4Ø12A VI,  $A_s=2,262$  см<sup>2</sup>);  $\sigma_T$  – расчетное сопротивление арматуры на растяжение [ $\sigma_s=8300-3000=5300$  кгс/см<sup>2</sup>, где 8300 кгс/см<sup>2</sup>

определено по СНиП 2.03.01-84, а 3000 кгс/см<sup>2</sup> – сумма потерь на релаксацию, температурные напряжения (первые и вторые потери напряжения)].

**Таблица 2.** Исходные данные для расчета

Район строительства		Нагрузки Дан/м <sup>2</sup>		Гололед, мм		Провод	Пролет, м	Расчетн. изгибающие моменты, кНм	
ветер	гололед	III	IV	III	IV			III <sub>вет/гол</sub>	IV <sub>вет/гол</sub>
III	III	50	65	10	15	АС-70/11	75	31	36

Римскими цифрами обозначена классификация районов по гололедно-ветровой нагрузке (СНиП 2.03.01-84)

Момент внешних сил определим с учетом коэффициента запаса 1,2:

$$M=1,2M_p.$$

Момент, воспринимаемый сечением в заделке, должен быть рассчитан по выражению:

$$M \leq \sigma_T A_s \left( h - 0,5 \frac{A_s \sigma_T}{b R_b} \right).$$

Примеры расчета прочности дефектных опор ВЛ 10 кВ, эксплуатируемых в СНГ, приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Пример расчета прочности дефектных опор ВЛ 10 кВ

Фактические данные			Коэф., $\alpha$	Изгибающий момент М, кНм		
Ширина трещин, мм	Корроз. армат., %	Прочность бетона, кгс/см <sup>2</sup>		Факт.	Расчетн. III ветер, IV гололед	Расчетн. IV ветер, IV гололед
1	15	194	0,123	22,5	37,2	43,2
3	30	220,5	0,089	18,84	37,2	43,2
1	3	364	0,075	41,4	37,2	43,2

### Расчет по трещиностойкости

Величина раскрытия трещин для ЖБК, эксплуатируемых на открытом воздухе и в грунте, для второй категории трещиностойкости (требуемых для опор) должна быть  $\alpha_{acc}=0,2$  мм (СНиП 2.03.01-84). На обследуемых опорах раскрытие трещин составило 1...5 мм, поэтому необходима проверка напряжения в растянутой арматуре ( $\sigma_s$ ) [1].

$$\sigma_s = \frac{M}{ZA_s},$$

где:  $Z$  – расстояние между осями сжатой и растянутой зоны ( $Z=28,0-2,6 \cdot 2=22,8$  см);  $M$  – момент внешних сил, равный 3; 37,2 и 43,2 кНм).

$$\alpha_{acc} = \delta \phi_1 \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100 \bar{\mu}_s)^{3/4} \sqrt{d},$$

где:  $\delta=1$  – для изгибаемых элементов;  $\phi_1=1,75$  – при переменном водонасыщении и высушивании;  $\eta=1$  – для арматуры периодического профиля.

$$\eta_s = \frac{A_{sp} A_s}{bh},$$

где:  $A_{sp}$ ,  $A_s$  – соответственно площадь сечения для напрягаемой и ненапрягаемой арматуры;  $d$  – диаметр арматуры с учетом коррозии.

Примеры расчета по трещиностойкости дефектных ЖБ опор ВЛ 10 кВ, эксплуатируемых в СНГ, приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Пример расчета по трещиностойкости дефектных опор ВЛ 10 кВ

Фактические данные			Напряжение в арматуре, кгс/см	
Ширина трещин, мм	Корроз. армат., %	Диаметр армат., мм	При фактич. раскрытии трещин	Расчетное
1	15	12	8979	5300
3	30	12	28078	5300

### Расчет зоны усиления конструкции

При классификации опор ВЛ 10 кВ по дефектности (табл. 1) следует, что для 1 и 2 вида дефектности опор характерна "шейная зона" разрушения. Учитывая убывание по высоте конструкции изгибающей нагрузки (основная нагрузка на опоры), можно рассчитать высоту, сечение на которой обеспечивает несущую способность стойки.

Очевидно, что сечение стойки ниже указанной высоты требует ремонта или усиления.

Примеры расчета зоны усиления дефектных опор ВЛ 10 кВ, эксплуатируемых в системе СНГ, приведены в табл. 5. Анализ табл. 5 показывает, что существует (особенно при малой зоне усиления) реальная возможность восстановления несущей способности конструкций. Однако, в каждом конкретном случае необходимо технико-экономическое обоснование применения методов восстановления дефектных опор ВЛ.

**Таблица 5.** Пример расчета зоны усиления дефектных опор ВЛ 10 кВ

Вид дефектности	Фактический изгибающий момент, кНм, $M_\phi$	Усилие от расчетной нагрузки, $Q = \frac{M_p}{H}$ , кН	Сечение, обеспечивающее несущую способность $H_1 = \frac{M_\phi}{Q}$ , м	Зона усиления $H_y = H - H_1$ , м	Варианты сочетания нагрузок
1	22,5	3,85	5,84	2,2	1
1	22,5	4,47	5,03	3,0	2 и 3
2	18,84	3,85	4,89	3,2	1
2	18,84	4,47	4,32	4,8	2 и 3

Примечание:  $H$  – высота приложения нагрузки, м

Варианты сочетания нагрузок

1 вариант:  
III район по ветру;  
III район по гололеду;  $M_p=31$  кНм

2 вариант:  
III район по ветру;  
IV район по гололеду;  $M_p=36$  кНм

3 вариант:  
IV район по ветру;  
III, IV районы по гололеду;  $M_p=36$  кНм

По результатам расчетов дефектных опор можно сделать вывод:

- При ширине раскрытия трещин 1...3 мм, коррозия арматуры 15...30 % и фактическая прочность бетона 194...220 кгс/см<sup>2</sup>, опоры не выдерживают нагрузки и их необходимо усилить.
- При ширине раскрытия трещин 1 мм, коррозия арматуры 1...3 % и фактическая прочность бето-

на более 300 кгс/см<sup>2</sup>, опоры выдерживают нагрузку и для них необходима заделка трещин, прогноз срока службы и наблюдение при дальнейшей эксплуатации линий.

- При разрушении защитного слоя оголенную, покрытую коррозией арматуру (вид 3), необходимо усилить дополнительными элементами с заделкой разрушенной части.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Ю.В., Демина Р.Ю., Горелов В.П. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. – Кн. 1. Теоретические основы / Под ред. д.т.н. проф. В.П. Горелова. – Новосибирск: НГавт, 1998. – 209 с.
2. Демин Ю.В., Демина Р.Ю., Горелов В.П. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. – Кн. 2. Практические рекомендации. / Под ред. д.т.н. проф. В.П. Горелова. – Новосибирск: НГавт, 1998. – 190 с.
3. Барг И.Г. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

УДК 68-83:681.513.68

## ЛОКАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.Г. Букреев, А.А. Богданов, С.К. Соснин, А.К. Чащин

Томский политехнический университет  
E-mail: vbuk@yandex.ru

*Рассматривается решение задачи синтеза оптимального управления электромеханическими системами с переменной структурой. Предлагается алгоритм локальной минимизации ошибки регулирования электромеханического объекта на каждом интервале дискретности импульсного преобразователя. В качестве примера рассмотрена задача стабилизации скорости электродвигателя постоянного тока с широтно-импульсным модулятором.*

#### Введение

Процедура оптимизации дискретных электромеханических систем предполагает стационарность параметров объекта управления на достаточно длительном интервале его функционирования [1]. Однако часто возникают ситуации, когда на интервалах дискретизации управляющего сигнала параметры непрерывного электромеханического объекта принимают различные значения. Данным свойством обладают, например широтно-импульсные системы и электромеханические системы с источником энергии ограниченной мощности. Для таких систем целесообразно организовать субоптимальный регулятор, обеспечивающий экстремальность назначенного критерия качества в некоторой ограниченной области. К таким регуляторам можно отнести локально-оптимальный регулятор, минимизирующий, например, ошибку регулирования в каждый момент времени [2].

#### 1. Постановка задачи

Пусть длительность функционирования электромеханической системы представлена точками  $t_0, t_1, \dots, t_k, \dots$  на интервалы дискретности, значения которых равны  $T = t_{k+1} - t_k$ , где  $k$  – целое действительное число. Внутри каждого интервала  $[t_k, t_{k+1}]$  поведение электромеханического объекта (ЭМО) управления описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + b_1 \quad \text{при} \quad t \in [t_k, t_k + \tau_k], \\ \dot{x}(t) &= A_2 x(t) + b_2 \quad \text{при} \quad t \in [t_k + \tau_k, t_k + T]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $x(t)$  –  $n$ -мерный вектор переменных состояния,  $b_1$  и  $b_2$  – внешние воздействия,  $A_1$  и  $A_2$  –  $n \times n$  – матрицы параметров. Управление объектом осуществляется за счет выбора последовательности значений  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k$ , (интервал формирования управляющего воздействия). Примером подобных систем являются автоматические системы с широтно-импульсной модуляцией. Пусть  $z(t) = c^T$  – желаемый скалярный выход объекта ( $c^T$  – вектор-строка,  $^T$  – символ транспонирования). Задачу управления можно поставить как задачу выбора такой последовательности значений  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k, \dots$ , при которых в установившемся режиме на каждом интервале времени  $T$  величина  $z(t)$  незначительно отличается от некоторого заданного значения  $z^*$ , т.е. выполняется неравенство

$$|z(t) - z^*| < \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – заданное малое число. Данное требование в другой формулировке можно рассматривать как задачу слежения за постоянным сигналом  $z^*$  на определенном интервале  $T$ .