

## References

1. Vorob'yev V.A. Elektroprivod sel'skokhozyaystvennykh mashin [Electric drive of agricultural machinery]. Moscow, OOO "TRANSLOG", 2016, 300 p. (in Rus.)
2. Vetoshkin A.G., Marunin V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability and safety of technical systems]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003, 154 p. (in Rus.)
3. Matveyevskiy V.R. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. Moscow, Izd-vo Mosk. gos. in-ta elektroniki i matematiki, 2002, 113 p. (in Rus.)
4. Gnedenko B.V. Kurs teorii veroyatnostey [A course of Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1965, 400 p.
5. Ore O. Teoriya grafov [Theory of graphs]. Moscow, Nauka, 1980, 336 p. (in Rus.)
6. Kharari F., Palmer E. Perechisleniye grafov [List of graphs]. Moscow, Mir, 1977. 324 p. (in Rus.)
7. Rozenberg V. Ya., Prokhorov A.I. Chto takoye teoriya massovogo obsluzhivaniya [What is queueing theory]. Moscow, Sovetskoye radio, 1965, 154 p. (in Rus.)
8. Venttsel' Ye.S. Issledovaniye operatsiy [Study of operations]. Moscow, Nauka, 1980, 208 p. (in Rus.)
9. Vorob'yev V.A. Elektricheskiye nagruzki sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy [Electrical requirements of agricultural enterprises]. Moscow, Izd. – vo MSKKhA, 1991, 297 p. (in Rus.)
10. Tokarev A.N. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika [Fundamentals of the theory of reliability and diagnostics]. Barnaul: Izd. – vo AltGTU, 2008, 168 p. (in Rus.)

*The paper was received on May 4, 2017*

УДК 621.31

DOI 10/26897/1728-7936-2018-1-63-68

**НЕКРАСОВ АЛЕКСЕЙ ИОСИФОВИЧ**, докт. техн. наук

E-mail: nalios@mail.ru

**ПОДОБЕДОВ ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ**

E-mail: podobiedov13@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»; 109428, Институтский 1-й, д. 5, Москва, Российская Федерация

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 10 КВ

На основе экспертных и статистических данных распределительных сетей напряжением 10 кВ исследованы составляющие отказов электрооборудования, их причины и варианты устранения. Произведен анализ надежности электрооборудования распределительной сети 10 кВ. Представлена многокритериальная методика оценки целесообразности перевооружения воздушных линий 10 кВ на новое электрооборудование с целью повышения надежности электроснабжения и качества электрической энергии. В качестве критериев многокритериальной оценки использования элементов воздушных линий электропередачи выбраны: недоотпуск электроэнергии, ущерб от недоотпуска, отклонение напряжения, неодинаковость напряжения, также в качестве фактора неопределенности среды был выбран рост загрузки. С целью проверки математического аппарата применяемой методики по пяти критериям выбраны две воздушные линии электропередачи 10 кВ Подольская МВС и Орловская РЭС. По итогам оценки надежности электроснабжения и качества электроэнергии выявлено, что анализируемые линии являются ненадежными, имеют большие потери напряжения, высокий недоотпуск электроэнергии и ущербы. На основании анализа рынка электрооборудования России были выбраны элементы воздушных линий электропередач и предложено восемь вариантов компоновок сетей 10 кВ с новыми элементами ВЛ с целью последующей оценки и разработки наиболее перспективной компоновки.

**Ключевые слова:** электрические сети, надежность электроснабжения, потери электроэнергии, частные критерии, качество электроэнергии, многокритериальная методика оценки.

**Введение.** В настоящее время проблемы с надежностью электроснабжения и качеством электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей достаточно велики. Из-за высокого процента износа электрических сетей, в частности сетевого оборудования (до 75%), а также ухудшения ка-

чества эксплуатации продолжительность перерывов в электроснабжении объектов возросла до 100-120 ч в год, а потери электроэнергии достигают до 20...30%. Отклонения напряжения у потребителей оцениваются от -15% до +15%. Несимметрия тока и напряжения, искажение кривых тока и напряжения гораздо выше предельно допустимых значений приводят к недоотпуску электроэнергии и выпуску продукции низкого качества, а также к дополнительным потерям электроэнергии [1].

Основным направлением по повышению надёжности электроснабжения является обновление технических средств, повышение их эксплуатационных характеристик, снижение стоимости элементов системы электроснабжения, а также разработка методики, позволяющей оценить целесообразность установки новых элементов сети. Важным направлением является снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях 10 кВ за счет применения нового оборудования.

В настоящее время появились направления и методики, позволяющие оптимизировать параметры систем электроснабжения на основании теории принятия решений и многокритериальности [2].

На базе основных требований к системам электроснабжения, статистических данных по отказам элементов сети, их эксплуатационных характеристик необходимо разработать методику оценки (по многокритериальной модели) целесообразности применения различных элементов воздушных линий электропередачи, повышающих надёжность электроснабжения и снижающих потери электроэнергии в распределительных сетях 10 кВ.

**Цель исследования** – анализ надёжности электрооборудования распределительной сети 10 кВ, разработка многокритериальной методики оценки целесообразности перевооружения воздушных линий 10 кВ на новое электрооборудование с целью повышения надёжности электроснабжения и качества электрической энергии.

**Материал и методы.** На основе экспертных и статистических данных распределительных сетей напряжением 10 кВ исследованы составляющие отказы электрооборудования, их причины и варианты устранения, проанализирован состав рынка электрооборудования России.

В целом оптимизация параметров по многокритериальной модели будет осуществляться по следующему алгоритму:

1. Выбор стратегий повышения характеристик линий 10 кВ, линии 10 кВ распределительной сети с целью оценки надёжности электроснабжения и качества электрической энергии.

2. Выбор и обоснование частных критериев оценки целесообразности применения электрооборудования, повышающего надёжность электроснабжения и снижающего потери в распределительных сетях 10 кВ.

3. Разработка математических моделей частных критериев оценки.

Разрабатываемая математическая модель частных критериев будет включать в себя аналитические уравнения частных критериев.

4. Выбор фактора неопределённости среды, который представлен в виде коэффициента роста нагрузок на перспективу [3].

5. Расчет частных критериев, рассматриваемых стратегий при различных коэффициентах роста нагрузок.

6. Расчет значений матрицы оценочного функционала.

7. Выбор оптимального варианта по критерию Байеса.

**Результаты и обсуждение.** В качестве критериев оценки целесообразности замены электрооборудования сети приняты [4]:

Недоотпуск электроэнергии за год из-за вероятных отказов элементов СЭС характеризует уровень надёжности системы электроснабжения.

$$W_{\text{недоотпуска}} = \sum S \cos \varphi (T_{\text{перерыва}}),$$

$$T_{\text{перерыва}} = \sum_i^n \left( \frac{\omega \tau + \gamma \mu t}{100} \right) L,$$

где  $\omega$  – частота аварийных отказов элементов схемы (отказов в год на 100 км линии);  $t$  – продолжительность одного отказа, ч;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий меньшую тяжесть плановых отключений;  $\mu t$  – время перерыва электроснабжения за год из-за плановых отключений, ч;  $S$  – полная максимальная мощность ВЛ 10 кВ, кВА;  $L$  – длина ВЛ 10 кВ, км.

На основе собранной статистики отказов элементов сети, а также проведенной экспертной оценки внесены уточнения в формулу. Выражение частоты отказов (отказов в год на 100 км линии) воздушной линии электропередач 10 кВ представлено в виде

$$\omega = \omega_{\text{опор}} + \omega_{\text{изоляция}} + \omega_{\text{провод}} + \omega_{\text{арм}},$$

где  $\omega$  – частота аварийных отказов элементов ВЛ 10 кВ;  $\omega_{\text{опор}}$  – частота аварийных отказов опор ВЛ 10 кВ;  $\omega_{\text{изоляция}}$  – частота аварийных отказов изоляторов ВЛ 10 кВ;  $\omega_{\text{провод}}$  – частота аварийных отказов проводов ВЛ 10 кВ;  $\omega_{\text{арм}}$  – частота аварийных отказов арматуры ВЛ 10 кВ.

Еще одним показателем надёжности электроснабжения является ущерб от недоотпуска электроэнергии [5]:

$$Y = Y' W_{\text{нед}}$$

где  $Y$  – ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб.;  $Y'$  – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб/кВт·ч;  $W_{\text{нед}}$  – недоотпуск электроэнергии кВт·ч/год.

Ущерб по удельным показателям в зависимости от аварийно- или планово-недоотпущенной электроэнергии во время перерыва электроснабжения определяется в соответствии с рекомендациями ФСК ЕЭС по тройному тарифу.

Отклонение напряжения – это один из самых важных показателей качества электроэнергии. Отклонение напряжения рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{\max} = \frac{Pr_0l + Qx_0l}{U_{\text{ном}}}$$

где  $r_0$ ,  $x_0$  – активное и реактивное сопротивление проводника, Ом;  $P$  – активная мощность, Вт;  $Q$  – реактивная мощность, Вар;  $l$  – длина линии, км;  $U_{\text{ном}}$  – напряжение сети, кВ.

Нагрузка изменяется во времени, при изменении показателя напряжений и иных факторов изменяется величина потери напряжения в сети и, следовательно, уровень напряжения  $U$ . В результате в одной точке в разные моменты времени отклонения напряжения различны.

Нормальная работа электрооборудования в сетях напряжением до 1 кВ обеспечивается при условии, что отклонения напряжения на их входе равны  $\pm 5\%$  (нормальное значение) и  $\pm 10\%$  (максимальное значение). В сетях напряжением 6-20 кВ устанавливается максимальное отклонение напряжения  $\pm 10\%$ .

Существует ряд промежуточных технико-экономических задач, которые невозможно решить, оценивая качество напряжения лишь по предельным отклонениям напряжения, но оперировать при их решении законами распределения отклонений напряжения слишком сложно. Поэтому на практике пользуются и другими критериями качества напряжения. Электротехник А. Айере предложил оценивать качество напряжения в точке  $i$  сети вторым

начальным моментом распределения отклонений напряжения во времени [6]:

$$H_i = (1/T) \int_t^{t+T} [V(t)]^2 dt,$$

где  $V(t)$  – изменяющееся во времени значение отклонения напряжения, %;  $T$  – период наблюдений.

Величину  $H$  называют неодинаковостью напряжения. В соответствии с корреляционно-регрессионным анализом в диссертации П.С. Переверзева неодинаковость у потребителя будет определяться с соответствующими коэффициентами:

$$H = 16,5 + 0,078\Delta U^2_{\max \text{ ВЛ10}}$$

Также величину неодинаковости напряжения называют интегральным критерием качества напряжения.

За фактор, оценивающий неопределенность среды, в которой функционирует ВЛ 10 кВ, был выбран рост нагрузки.

В качестве анализируемых линий были выбраны две воздушные линии электропередачи с целью проверки математического аппарата применяемой методики по пяти критериям. Одна из них – линия Московских высоковольтных сетей, находящаяся в Подольском районе и отходящая от подстанции «Молчаново», вторая линия находится на балансе Орловских РЭС, имеет высокую протяженность и питает предприятие молочной промышленности «Протасовское Коллективное предприятие» и отходит от подстанции «Подлесная» (рисунок).

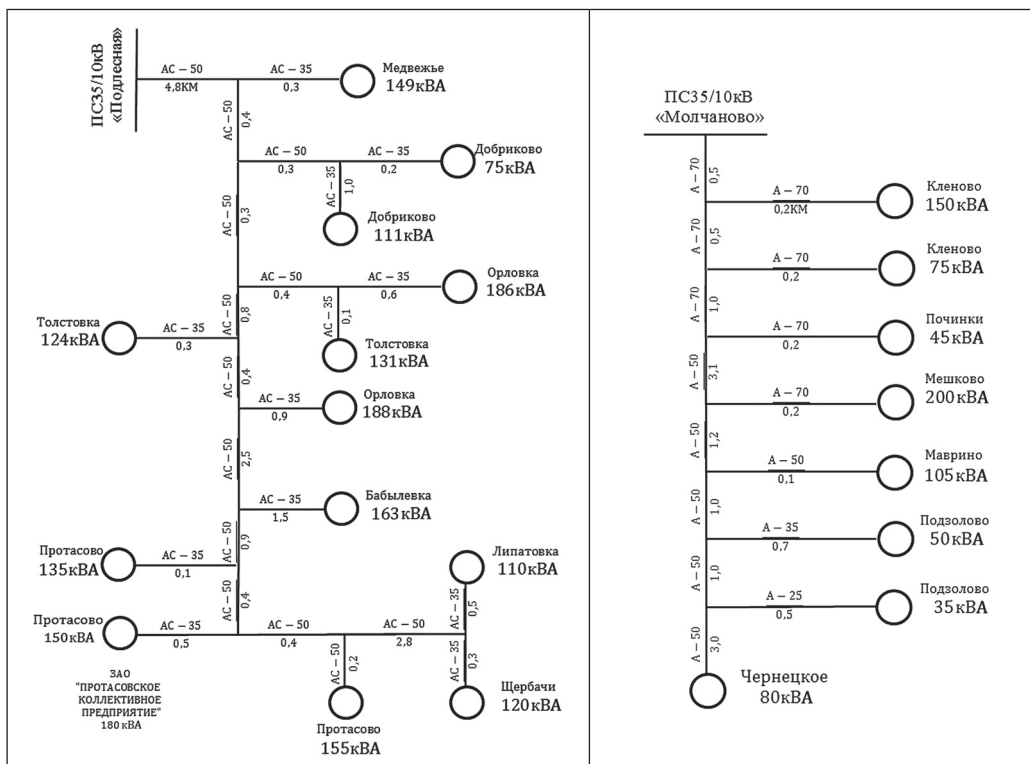


Рис. Схемы ВЛ 10 кВ Подольской МВС и Орловской РЭС

Итоги оценки надежности электроснабжения и качества электроэнергии по предложенным критериям

двух анализируемых воздушных линий электропередачи 10 кВ представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

**Показатели перерыва электроснабжения и недоотпуска электроэнергии в год на линии Орловских РЭС и МВС по трем источникам расчетных данных**

Анализируемая линия	Источник исходных данных	Недоотпуск электроэнергии, кВт·ч/год	Время перерыва электроснабжения, ч
Орловские РЭС	Неклепаев Б.Н.	23160	19,3
Орловские РЭС	Блок В.М.	6600	5,5
Орловские РЭС	Данные экспертной оценки	30511	25,4
Линия МВС	Неклепаев Б.Н.	6260	12,3
Линия МВС	Блок В.М.	1781	3,5
Линия МВС	Данные экспертной оценки	7579	16,3

Таблица 2

**Экономические ущербы линий**

Линия	Ущерб, руб.
Орловские РЭС	435730
Подольские МВС	90948

Из таблиц 1, 2 следует, что линии требуют модернизации и замены оборудования. Суммарные потери до дальней точки присоединения на линии Орловских РЭС составят 685 В, на линии МВС 163 В.

Для повышения надежности электроснабжения, на основании метода экспертных оценок

и сравнения элементов по техническим характеристикам (табл. 3, 4), разработаны стратегии по перевооружению линий 10 кВ (компоновки) (табл. 5).

Для сравнения возьмем марки проводов сечением 50 мм<sup>2</sup>.

Таблица 3

**Сравнение рекомендуемых изоляторов по техническим характеристикам**

Характеристика	ШС-10	ШФ-10	ОЛСК-16-20-А	ШС-20Д	ШТИЗ-20УО	ОЛК-12,5-20	ШПФ-20А
Рабочее напряжение, кВ	10	10	20	20	20	20	20
Механическая сила, разрушающая при изгибе, кН	12,5	12,5	16	13	13	12,5	12,5
Длина пути утечки, мм	256	256	780	380	305	350	470
Выдерживаемое импульсное напряжение, кВ	100	100	150	100	125	145	140
Выдерживаемое напряжение частотой 50 Гц под дождем, кВ	40	40	60	40	65	67	70
Масса, кг	2	1,9	3,3	2,2	1,7	0,7	2,3

Элементы ВЛ 10 кВ, используемые для составления компоновок линии, были выбраны на основании результатов опыта эксплуатации, доступности

на российском рынке электрооборудования и рекомендаций экспертов, показавших перспективность их применения на сетях.

Таблица 4

**Сравнение рекомендуемых проводов по техническим характеристикам**

Характеристика	АС	А	СИП-3	ПЗВ	АСПТ(к)
Диаметр, мм	9,6	9	13	14,5	8,74
Сечение, мм	50	50	50	50	50
Разрывное усилие, кН	17,11	8,19	14,21	14	18,96
Рабочая температура, °С	До 90	До 90	До 95	До 95	До 150
Токонесущая способность, А	210	215	245	230	362
Сопротивление постоянному току на 1 км (при 20°С), Ом	0,5951	0,5784	0,5880	0,5820	0,5723
Вес на 1 км, кг	195	135	215	244	183

Таблица 5

**Компоновки ВЛ 10 кВ, анализируемые по многокритериальной модели**

Компоновка №	Стойки опор	Изоляторы	Провода
1	Деревянные (пропитанные)	ШС-10	АС
2	ЖБ-СВ 95-3с	ШФ-10	АС
3	ЖБ-СВ 115-7	ЩТИЗ-20(УО)	СИП-3
4	ЖБ-СВ 115-7	ШПФ-20А	ПЗВ
5	ЖБ-СВ 115-7	ОЛК-12,5-10	ПЗВ
6	ЖБ-СВ 115-7	ОЛСК-16-20-Б	СИП-3
7	ЖБ-СВ 115-7	ШС-20Д	АСПТ(к)
8	ЖБ-СВ 115-7	ОЛСК-16-20-Б	ПЗВ

Анализ целесообразности использования компоновок планируется проводить с применением метода многокритериальной оценки, аппарата нечетких множеств и при наличии фактора неопределенности среды. Все это позволит выявить наиболее перспективный вариант переоснащения воздушных линий электропередач 10 кВ.

**Выводы**

На основе проведенного анализа определен уровень надежности ВЛ 10 кВ, недостатки и преимущества оборудования электросетевого комплекса, установленного в сети, показана целесообразность выбора новых элементов сети в распределительных сетях 10 кВ и замены оборудования.

Многокритериальная оценка позволит выявить лучший вариант по переоснащению линии по надежности электроснабжения, качеству электрической энергии и технико-экономическим показателям.

При дальнейшей работе планируется применить аппарат теории нечетких множеств для выбора оптимального варианта переоснащения сельских ВЛ 10 кВ.

**Библиографический список**

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. 716 с.
2. Князев П.В. Выбор и оценка источников электропитания отдаленных сельскохозяйственных районов: Автореферат канд. дис. М.: МГАУ им. Горячкина, 2005.
3. Лещинская Т.Б., Князев В.В. Многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей. М.: МГАУ имени В.П. Горячкина, 2006. 100 с.
4. Подобедов П.Н. Методика оценки предложенных конструкций изоляторов и проводов по многокритериальной модели // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 3. С. 244-245.
5. Левин М.С., Лещинская Т.Б. Методы теории решений в задачах оптимизации систем электропитания. М.: ВИПКЭнерго, 1989. 130 с.
6. Будзко И.А., Левин М.С. Электропитание сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. М.: Агропромиздат, 1985. 536 с.

Статья поступила 4.09.2017

## MULTICRITERIAL EVALUATION OF USING ELEMENTS OF 10 KV ELECTRIC OVERHEAD TRANSMISSION LINES

*ALEKSEI I. NEKRASOV, DSc (Eng)*

E-mail: nalios@mail.ru

*PAVEL N. PODOBEDOV, post-graduate student*

E-mail: podobiedov13@mail.ru

Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM"; 109428, Institutskiy 1-iy proyezd, 5, Moscow, Russian Federation

Basing on expert and statistical data of distribution networks with a voltage of 10 kV, the authors have studied the elements of electrical equipment failures, their causes and possible solutions. They have also made the reliability analysis of electrical equipment of a 10 kV distribution network. The paper presents a multicriteria methodology for assessing the feasibility of re-equipping 10 kV-overhead lines (OHL) to improve the reliability of electricity supply and the quality of electrical energy. The chosen criteria for the multi-criteria evaluation of using the OHL elements include electricity under-supply, damages from under-supply, voltage deviation, and voltage unevenness. The load growth has also been chosen as the environment uncertainty factor. In order to test the mathematical apparatus of the considered methodology, five overhead transmission lines of 10 kV Podolsk MVS (Moscow High-Voltage Power Network) and Orlovskaya RPS (Power Grid District) have been selected according to five criteria. Basing on the results of assessing the reliability of electricity supply and the quality of electricity, the authors have revealed that the analyzed lines are unreliable, as they feature large voltage losses, high power under-supply and resulting damages. Basing on the analysis of the electrical equipment market in Russia, the authors have selected elements of overhead transmission lines and eight variants of 10 kV-grid configurations with new OHL elements with the purpose of subsequent evaluation and development of the most promising layout.

**Key words:** electrical networks (power grids), reliability of power supply, power losses, partial criteria, quality of electricity, multi-criteria evaluation methodology.

### References

1. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Peredacha i raspredeleniye elektricheskoy energii [Transmission and distribution of electrical energy]. Rostov-na-Donu, Feniks, 2008, 716 p. (in Rus.)
2. Knyazev P.V. Vybory i otsenka istochnikov elektrosnabzheniya ot dalennykh sel'skokhozyaystvennykh rayonov [Selection and evaluation of power supply sources in remote agricultural areas]: Self-review of PhD (Eng) thesis. Moscow, MGAU im. Goryachkina, 2005. (in Rus.)
3. Leshchinskaya T.B., Knyazev V.V. Mnogokriterial'naya otsenka tekhniko-ekonomicheskogo sostoyaniya raspredelitel'nykh elektricheskikh setey [Multicriteria assessment of the technical and economic condition of electrical distribution networks]. Moscow, MGAU imeni V.P. Goryachkina, 2006, 100 p. (in Rus.)

4. Podobedov P.N. Metodika otsenki predlozhennykh konstruktivnykh izolyatorov i provodov po mnogokriterial'noy modeli [Methodology of evaluating the proposed designs of insulators and wires for a multicriteria model]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2014, No. 3. Pp. 244-245. (in Rus.)

5. Levin M.S., Leshchinskaya T.B. Metody teorii resheniy v zadachakh optimizatsii sistem elektrosnabzheniya [Methods of solution theory in addressing problems of optimizing power supply system]. Moscow, VIPKenergo, 1989, 130 p. (in Rus.)

6. Budzko I.A., Levin M.S. Elektrosnabzheniye sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy i naselennykh punktov [Electricity supply of agricultural enterprises and settlements]. Moscow, Agropromizdat, 1985, 536 p. (in Rus.)

*The paper was received on September 4, 2017*