

УДК 62.192  
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-59-63

Т. Д. ГЛАДКИХ

Тюменский  
индустриальный университет,  
филиал, г. Нижневартовск

## МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

Предложены модели надежности для систем электроснабжения объектов нефтедобычи. Выделено два типа электротехнических комплексов: электрическая сеть с потребителем, чувствительным к провалам напряжения и электрическая сеть с потребителем, имеющим технологическое резервирование. Комплексное рассмотрение системы электроснабжения и потребителя электрической энергии позволило уточнить показатели надежности. В статье отмечена важность взаимодействия электроснабжающих компаний и потребителей электрической энергии для повышения эффективности работы технологических объектов.

**Ключевые слова:** надежность электротехнического комплекса, марковские модели, провалы напряжения, временная избыточность.

**Введение.** Повышение надежности электрических сетей является одним из главных факторов минимизации длительности отказов электроснабжения потребителей и, следовательно, способствует росту эффективности производственных процессов.

Зачем необходимо оценивать надежность системы электроснабжения?

Во-первых, оценка надежности необходима для определения соответствия топологии электрических сетей (ЭС) требованиям безотказности электроснабжения потребителей.

Во-вторых, мы можем оценить эффективность системы обслуживания электрических сетей. Например, если при надлежащем уровне резервирования в системе электроснабжения потребителя наблюдается высокая частота отказов ЭС, следует определить направление повышения качества технического обслуживания, в том числе увеличение доли оборудования, обслуживаемого по фактическому техническому состоянию. Через показатели надежности можно определить требования по качеству обслуживания ЭС. То есть данные показатели можно использовать для формирования нормативных документов.

В-третьих, показатели надежности позволяют количественно оценить динамику безотказности

электроснабжения при проведении каких-либо технико-экономических мероприятий.

В работе [1] показано, что показатели надежности являются основой для планирования, модернизации и реконструкции электрических сетей. В работе [2] анализируется структурная надежность сетей с использованием байесовского подхода. Авторы статьи [3] предполагают, что показатели надежности являются ключевыми при разработке методики прогнозирования критических ситуаций, таких как внезапное снижение мощности в сети или ухудшение качества напряжения. Методы оценки вероятностных показателей надежности предлагаются в работе [4] для определения долгосрочного прогноза по недоотпуску энергии и ожидаемой потери нагрузки. Во многих работах отмечается необходимость комплексной оценки надежности, например, в статье [5] акцентируется важность объединения различных подсистем электроснабжения (от генерации до распределения) для получения точных показателей безотказности.

Также отметим, что модели надежности будут основой для создания умных сетей [6], и точность этих моделей является важным фактором для внедрения.

**Постановка задачи.** В настоящее время аналитические методы расчета обеспечивают точное

решение задач надежности, но они не могут быть универсальными и обширно применимыми в промышленности из-за специфики производств и громоздкости систем. В нашей работе предлагается производить анализ надежности системы электроснабжения с учетом специфики потребителя, принимая во внимание чувствительность технологических объектов к качеству напряжения и наличие временной избыточности (технологического резервирования).

В работе рассматриваются нефтепромысловые электрические сети Западной Сибири. Данные сети характеризуются рассредоточением по обширной территории, проектируются, как правило, с большой перегрузочной способностью, уровень напряжения этих сетей 35 и 6 кВ.

Основное требование к надежности нефтепромысловых электрических сетей — это снижение недоотпуска продукции (добытой нефти) из-за отказа электроснабжения.

С этой позиции состояние отказа электрической сети и отказа электроснабжения потребителя не всегда совпадают. Например, провал напряжения не является отказом электрической сети, но может вызвать останов добывающих скважин. Основное электрооборудование добывающих скважин — это погружные двигатели в составе УЭЦН. Провалы напряжения вызывают уменьшение вращающего момента двигателей, возникают недопустимые значения скольжения и возможный останов приводов. В этом случае объект добычи имеет недоотпуск продукции на время восстановления технологического процесса. Например, потери в добыче нефти по вине провалов напряжения составили 5399 тонн за 2014 год на Самотлорском месторождении.

Объекты подготовки и транспорта нефти (например, дожимные насосные станции) являются последующими в технологической цепочке после добывающих скважин. Отказ электроснабжения этих объектов может вызывать вынужденный простой объектов добычи, но, используя резервуарный парк (технологическое резервирование), процесс добычи жидкости из скважин можно не останавливать, следовательно, ущерба от недоотпуска электрической энергии не будет.

С этой позиции принято следующее понятие отказа. Отказ — это состояние электротехнического комплекса, при котором происходит останов процесса добычи жидкости из скважин из-за нарушений в системе электроснабжения. Признаком отказа является останов процесса добычи углеводородного сырья.

**Теория.** В моделях надежности рассмотрели комплексно систему электроснабжения и потребителя (в дальнейшем электротехнический комплекс).

Рассмотрим состав нефтепромысловых ЭС с точки зрения специфики потребителей и выделим два типа электротехнических комплексов (ЭТК) (рис. 1).

ЭТК 1-го типа — электрическая сеть кустов добывающих скважин. К причинам отказов этого комплекса относятся неработоспособное состояние ЭС, а также провалы и прерывания напряжения.

ЭТК 2-го типа — это электрические сети объектов подготовки и транспорта нефти от куста скважин до центрального товарного парка. Основные потребители электроэнергии — приводы насосного оборудования. Они имеют значительные моменты инерции, поэтому к провалам напряжения менее

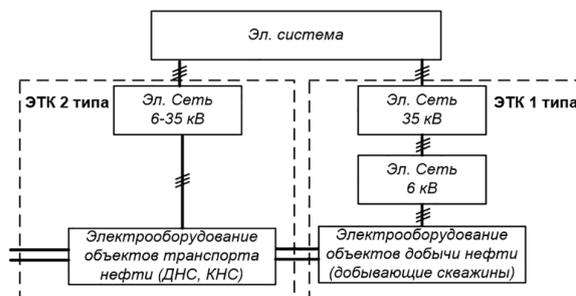


Рис. 1. Состав электротехнических комплексов

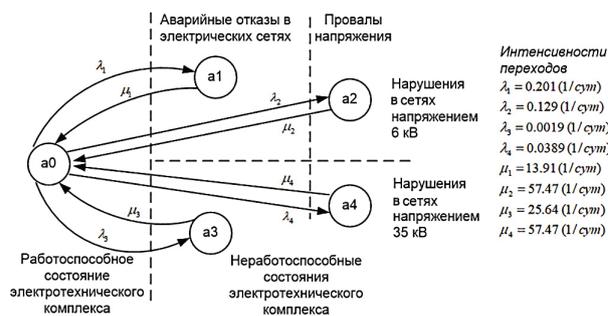


Рис. 2. Граф состояний для ЭТК 1-го типа

чувствительны. Отказ электроснабжения этих потребителей может вызывать вынужденный простой объектов добычи нефти (то есть потребителя ЭТК 1-го типа). Модель надежности данного ЭТК учитывает технологическое резервирование, которое позволяет не останавливать процесс добычи нефти. Признаком отказа этого комплекса является неработоспособное состояние ЭС при отсутствии временной избыточности в технологическом объекте.

При создании моделей надежности используем теорию марковских процессов, так как она позволяет учитывать множество состояний объектов (не только работоспособное/неработоспособное состояние) вне зависимости от траектории процесса (предыдущего состояния и его длительности). Об этом достоинстве марковского процесса отмечено в [7], где в модели надежности учтены независимые друг от друга параметры (вырабатываемая мощность ветрогенератора, интенсивность отказов и частота ремонтов).

В наших моделях интенсивности переходов определены на основе статистических данных и технологических нормативов, плотности распределения величин приняты экспоненциальными.

#### Результаты экспериментов.

**Модель надежности электротехнического комплекса 1-го типа.**

Причинами отказа ЭТК 1-го типа являются следующие состояния в электрических сетях:

1. Аварийные отказы — состояния перерыва электроснабжения. Аварийные отказы вызваны состоянием невозможности выполнять требуемые функции должным образом из-за внутренней неисправности [8].

2. Провалы напряжения — внезапное снижение напряжения в точке электроэнергетической системы с последующим восстановлением напряжения через короткий промежуток времени, от несколь-

ких периодов синусоидальной волны напряжения до нескольких секунд [8].

Граф состояний ЭТК представлен на рис. 2. Надежность ЭТК описана работоспособным состоянием  $\{a0\}$  и множеством неработоспособных состояний  $\{a1, a2, a3, a4\}$ .

В графе состояний переходы описываются следующими параметрами:

— интенсивностью аварийных отказов в сети 6кВ  $\lambda_1$  и в сети 35 кВ  $\lambda_3$ ;

— интенсивностью восстановлений после аварийных отказов, определенной на основе данных по среднему времени восстановления, для сети 6кВ  $\mu_1$  и для сети 35 кВ  $\mu_3$ ;

— интенсивностью отказов ЭТК из-за провалов напряжения в сетях 6кВ и 35 кВ соответственно  $\lambda_2, \lambda_4$ ;

— интенсивностью восстановлений электротехнического комплекса после провалов напряжения, которая определяется временем ручного пуска  $T_B$  оборудования скважин  $\mu_2 = \mu_4 = 1/T_B$ .

Система дифференциальных уравнений Колмогорова имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -p_0(t) \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) + \\ + p_1(t) \cdot \mu_1 + p_2(t) \cdot \mu_2 + p_3(t) \cdot \mu_3 + p_4(t) \cdot \mu_4; \\ \frac{dp_1}{dt} = p_0(t) \cdot \lambda_1 - p_1(t) \cdot \mu_1; \\ \frac{dp_2}{dt} = p_0(t) \cdot \lambda_2 - p_2(t) \cdot \mu_2; \\ \frac{dp_3}{dt} = p_0(t) \cdot \lambda_3 - p_3(t) \cdot \mu_3; \\ \frac{dp_4}{dt} = p_0(t) \cdot \lambda_4 - p_4(t) \cdot \mu_4. \end{cases}$$

При нулевых начальных условиях  $p_0(0) = 1$ ,  $p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = 0$  была решена система уравнений с использованием прикладного программного пакета Maple 14. Расчет модели проведен по данным об отказах за 2014 г. для Самотлорского месторождения. Предельная вероятность безотказной работы ЭТК составила  $P = p_0(t \rightarrow \infty) = 0,9812$  (рис. 3, кривая 1), коэффициент готовности системы 0,9976 (при желаемом 0,9999).

На основе полученной модели, установили связь вероятности безотказной работы от интенсивности отказов ЭТК по вине провалов напряжения. На рис. 2 изображено семейство графиков при снижении частоты отказов из-за провалов напряжения с шагом 20%. В случае отсутствия провалов напряжения, вызывающих останов технологического объекта, предельная вероятность безотказной работы составляет  $P = 0,9860$  (рис. 3, кривая 2).

Таким образом, одним из направлений повышения надежности электроснабжения объектов добычи углеводородного сырья является разработка превентивных мер против провалов напряжения. В работе [9] отмечается, что процесс восстановления величины напряжения практически неизбежно требует закачки энергии от компенсатора во внешнюю систему и требует капитальных вложений в распределенную генерацию. Подобное отмечено в работе [10], что наиболее эффективными мерами борьбы с провалами напряжения являются источники бесперебойного питания или электростанций собственных нужд.

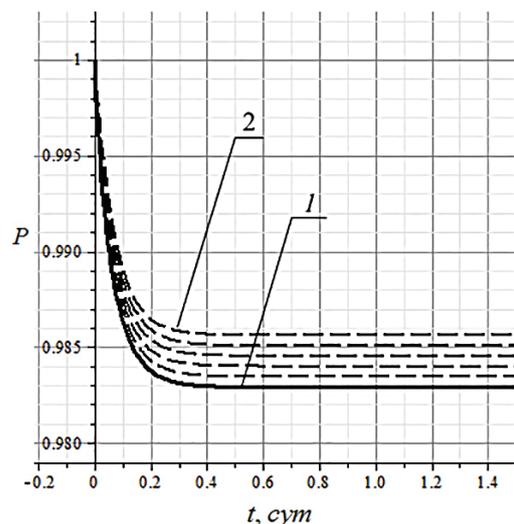


Рис. 3. Вероятность безотказной работы ЭТК 1-го типа

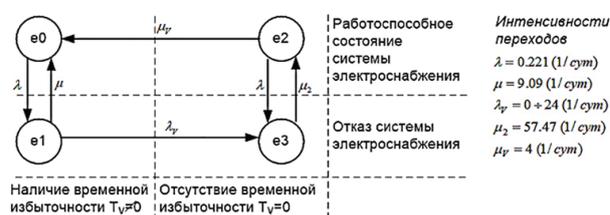


Рис. 4. Граф состояний ЭТК 2-го типа

С другой стороны, в работе [11] предлагается улучшение конструкции оборудования (усиление против возможности провала напряжения). Некоторые технические средства ограничения влияния провалов напряжения перечислены в [12, 13].

**Модель надежности электротехнического комплекса 2-го типа.** Объектом моделирования является электротехнический комплекс «система электроснабжения — технологический объект с временной избыточностью». Временная избыточность обусловлена возможностью технологических объектов (ДНС, КНС) собирать добытую жидкость со скважин в свободный объем резервуарного парка, при условии рабочего состояния ЭТК 1-го типа.

Граф состояний и переходов ЭТК представлен на рис. 4.

Электротехнический комплекс описывается множеством состояний  $E = \{e_0, e_1, e_2, e_3\}$ , где подмножество работоспособных состояний  $E_+ = \{e_0, e_1, e_2\}$ . Неработоспособное состояние  $e_3$  — имеет место при отказе системы электроснабжения и при отсутствии свободного объема в резервуарном парке  $V=0$ .

В состоянии  $e_0$  система электроснабжения работоспособна и в резервуарном парке имеется свободный объем  $V \neq 0$ . В состоянии  $e_1$  происходит отказ системы электроснабжения, и используется свободный объем резервуарного парка  $V \neq 0$ . В состоянии  $e_2$  система электроснабжения работоспособна, и резервуарный парк восстанавливает требуемый технологией свободный объем  $V=0$ .

Интенсивности переходов следующие: интенсивность отказа системы электроснабжения  $\lambda$ ; интенсивность восстановления системы электроснабжения  $\mu$ ; интенсивность отказа электротех-

нического комплекса  $\lambda_V = 1/T_V$  определяется величиной временной избыточности  $T_V = V/q$ , где  $V(\text{м}^3)$  — свободный объем резервуарного парка,  $q$  ( $\text{м}^3/\text{сут.}$ ) — производительность оборудования, наполняющего резервуар; интенсивность восстановления ЭТК  $\mu_2$ , определяется временем восстановления технологического процесса  $\mu_2 = 1/T_B$ ; интенсивность восстановления свободного объема резервуара  $\mu_V$  определяется максимальной производительностью насосов, опорожняющих резервуарный парк.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -p_0(t) \cdot \lambda + p_1(t) \cdot \mu + p_2(t) \cdot \mu_V; \\ \frac{dp_1}{dt} = p_0(t) \cdot \lambda - p_1(t) \cdot (\mu + \lambda_V); \\ \frac{dp_2}{dt} = -p_2(t) \cdot (\mu_V + \lambda) + p_3(t) \cdot \mu_2; \\ \frac{dp_3}{dt} = p_1(t) \cdot \lambda_V + p_2(t) \cdot \lambda - p_3(t) \cdot \mu_2. \end{cases}$$

Вероятность работоспособных состояний электротехнического комплекса определяется выражением  $R(t) = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t)$ . На рис. 5 представлено семейство графиков  $R(t)$  при различной величине временной избыточности  $T_V$  (0; 1; 5; 10; 20; 60 мин.).

Предельная вероятность безотказной работы ЭТК при отсутствии временной избыточности составляет  $R(t \rightarrow \infty) = 0,9928$ , а при наличии избыточности 60 мин. составляет  $R(t \rightarrow \infty) = 0,9940$ . На рис. 6 показана зависимость предельной вероятности безотказной работы  $R' = R(t \rightarrow \infty)$  от величины временной избыточности  $T_V$ . По графику видно, что с увеличением свободного объема в резервуарном парке (временной избыточности  $T_V$ ) в случае отказа электроснабжения объектов транспорта нефти, вероятность работоспособного состояния объектов добычи жидкости из скважин увеличивается.

**Заключение.** Разработаны математические модели надежности для разных типов электротехнических комплексов. Поскольку показатели надежности электроснабжения напрямую связаны с возможным экономическим ущербом, их анализ позволяет определить направления снижения недоотпуска продукции технологических объектов. С этой позиции на основе полученных моделей целесообразным видится применение мер по защите потребителей от провалов напряжения и наличии, при технологических возможностях, заданной величины временной избыточности в электротехническом комплексе.

Таким образом, для достижения точности моделей надежности электроснабжения потребителей необходимо учитывать особенности (чувствительность к показателям качества электрической энергии) и возможности (наличие временной избыточности) технологических объектов.

#### Библиографический список

1. Chernysheva A., Adamec V., Tulsy V., Vanin A. Calibration of the distribution network reliability model based on failure data. Case Study // 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2019. P. 1–5. 8708769. DOI: 10.1109/REEPE.2019.8708769.

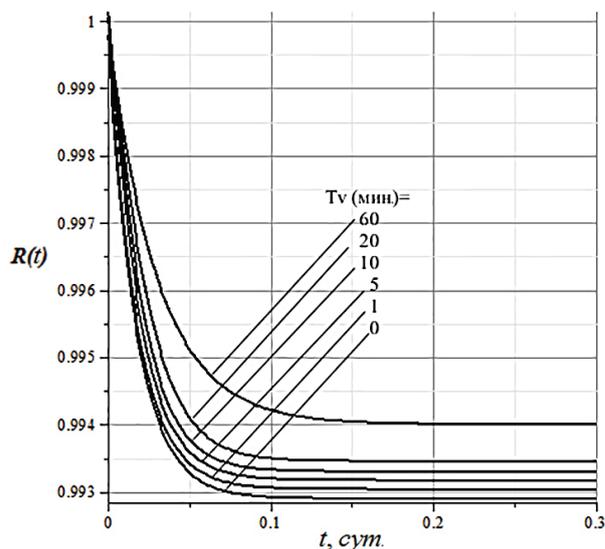


Рис. 5. Вероятности работоспособных состояний ЭТК при различных величинах временной избыточности

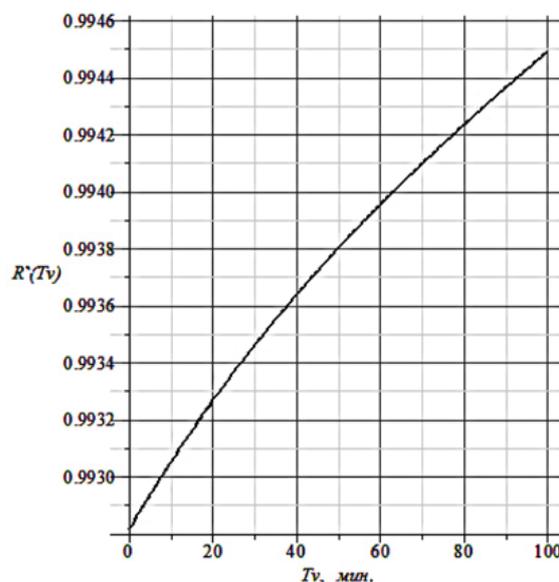


Рис. 6. Зависимость предельной вероятности безотказной работы ЭТК от величины временной избыточности

2. Ciobanu A., Munteanu F., Nemes C. Bayesian networks utilization for reliability evaluation of power systems // 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). 2016. P. 837–841. DOI: 10.1109/ICEPE.2016.7781454.

3. Dumbrava V., Ulmeanu A. P., Scutariu M. [et al.]. Analysis of reliability aspects of wind power generation in Romania using Markov models // IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). 2011. P. 1–5. DOI: 10.1049/cp.2011.0173.

4. Bagen B., Moura J., Jefferies K. Probabilistic reliability assessment of North American Electric Power Systems // 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/PMAPS.2014.6960600.

5. Miao Y., Luo W., Lei W. [et al.]. Power supply reliability indices computation with consideration of generation systems, transmission systems and sub-transmission systems' load transfer capabilities // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy

- Engineering Conference (APPEEC). 2016. P. 1840–1844. 37726579. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779807.
6. Heidari-Kapourchali M., Aravinthan V. Component reliability evaluation in the presence of smart monitoring // 2013 North American Power Symposium (NAPS). Manhattan. KS. 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS.2013.6666922.
7. Kahrobaee S., Asgarpour S. Short and long-term reliability assessment of wind farms // North American Power Symposium 2010. 2010. P. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS.2010.5618951.
8. IEC International Electrotechnical Commission — Part 614: Generation, transmission and distribution of electricity — Operation. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=614-01-08> (дата обращения: 24.02.2021).
9. Choi S. S., Li J. D., Vilathgamuwa D. M. A generalized voltage compensation strategy for mitigating the impacts of voltage sags/swells // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, no. 3. P. 2289–2297. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848442.
10. Егоров А. В., Ершов М. С. Обеспечение устойчивости многомашинных электротехнических систем непрерывных производств // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016. С. 585–590.
11. Qian Y., Zhang Y., Chen M. [et al.]. Research and application of test system for voltage dip ride through capability of electrical equipments // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2014. P. 168–172. 10256236. DOI:10.1109/CICED.2014.6991686.
12. Ершов С. В., Пигалов М. С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 95–104.
13. Зацаринная Ю. Н., Маргулис С. М., Федотов Е. А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10, № 1 (37). С. 55–63.

---

**ГЛАДКИХ Татьяна Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры гуманитарно-экономических и естественнонаучных дисциплин.

SPIN-код: 7218-7389

AuthorID (РИНЦ): 754098

ORCID: 0000-0003-0568-4109

AuthorID (SCOPUS): 38661176000

Адрес для переписки: txgl@yandex.ru

#### Для цитирования

Гладких Т. Д. Модели надежности электроснабжения объектов нефтедобычи // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 59–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-59-63.

Статья поступила в редакцию 09.03.2021 г.

© Т. Д. Гладких