УДК 621.376:621.3.019.3; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-4.07
https//orcid.org/0000-0003-0272-3264
https//orcid.org/0000-0002-9838-8307
https//orcid.org/0000-0001-5858-6807
https//orcid.org/0000-0001-7319-2038

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6...10 КВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.Г. ДЖУМАМУХАМБЕТОВ[1],
член-корр. НИА РК, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроснабжение»,
nasikhan_d@mail.ru

В.А. ЯШКОВ[2],
кандидат технических наук, профессор Института нефтехимической инженерии и экологии им. Н.К. Надирова Атырауского университета нефти и газа им. С. Утебаева,
yashkov2409@mail.ru

Д.У. КУЛЬЖАНОВ[2],
доктор физ.-мат. наук, профессор Института нефтехимической инженерии и экологии им. Н.К. Надирова Атырауского университета нефти и газа им. С. Утебаева,
d.u.kulzhanov@mail.ru

Е.У. АРСТАНАЛИЕВ[2],
кандидат технических наук, профессор Института нефтехимической инженерии и экологии им. Н.К. Надирова Атырауского университета нефти и газа им. С. Утебаева,
esen-65@mail.ru

[1]НАО «КАЗАХСКИЙ АГРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. С. СЕЙФУЛЛИНА»,
Республика Казахстан, 010011, г. Нур-Султан, пр. Женис, 62

[2]НАО «АТЫРАУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ. С. УТЕБАЕВА»,
Республика Казахстан, 060027, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45А

В статье рассмотрены вопросы оценки влияния метеофакторов на функционирование наиболее повреждаемых в рассматриваемом регионе воздушных линий, моделирование которых с учетом модели погоды дает более реалистические показатели, в виде средних времени пребывания процесса в состояниях, наработки на отказ, времени восстановления, числа переходов в неработоспособное состояние.

Показано, что с точки зрения причин возниконовения повреждений воздушных линий, приводящих к отказу, решающее значение имеет природно-климатическое воздействие: пыльные бури, загрязнение, резкое колебание температуры.

Методика исследований основывалась на классическом аппарате математической статистики и теории надежности. Для разработки моделей надежности основных элементов систем электроснабжения – воздушных линий использовалась теория Марковских случайных процессов и моделирования процессов и систем.

В плане практической ценности разработаны модели, учитывающие условия окружающей среды и определены для использования в проектной и эксплуатационной практике основные показатели надежности систем электроснабжения: средняя наработка на отказ, среднее время востановления и среднее количество переходов в неработоспособное состояние. Использование Марковских моделей, описывающие системы электроснабжения на уровне случайных процессов, позволяет применить на практике методики оценки и прогнозирования надежности систем электроснабжения, функционирующих в условиях влияния внешней среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *модели погоды, показатели надежности, вероятности состояний, граф состояний и переходов.*

МҰНАЙ-ГАЗ ОБЪЕКТІЛЕРІҢ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ҮШІН 6....10 КВ ӘУЕ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ СЕНІМДІЛІГІН МОДЕЛЬДЕУ

Н.Ғ. ЖҰМАМҰХАМБЕТОВ[1], ҚР ҰИА корреспондент-мүшесі, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, *nasikhan_d@mail.ru*
В.А. ЯШКОВ[2], техникалық ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, *yashkov2409@mail.ru*
Д.Ө. ҚҰЛЖАНОВ[2], физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, *d.u.kulzhanov@mail.ru*
Е.Ө. АРСТАНАЛИЕВ[2], техникалық ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, *esen-65@mail.ru*

[1]КЕАҚ С. СЕЙФУЛЛИН АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ АГРОТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ,
Республикасы Қазақстн, 010011, Нұр-сұлтан қ. Жеңіс даңғылы. 62

[2]КЕАҚ С. ӨТЕБАЕВ АТЫНДАҒЫ АТЫРАУ МҰНАЙ ЖӘНЕ ГАЗ УНИВЕРСИТЕТІ,
Республикасы Қазақстан, 060027, Атырау қ., Баймұханов к-сі, 45а

Мақалада ауа-райы моделін ескере отырып, модельдеу процестің күйлерде болуының орташа уақыты, істен шығу уақыты, қалпына келтіру уақыты, жұмыс істемейтін күйге өту саны түрінде неғұрлым нақты көрсеткіштер беретін қарастырылып отырған аймақтағы ең көп зақымдалған әуе желілерінің (ӘЖ) жұмысына метеофакторлардың әсерін бағалау мәселелері қарастырылған. Ақауларға әкелетін ӘЖ зақымдануының себептері тұрғысынан табиғи-климаттық әсер өте маңызды: шаңды дауылдар, ластану, температураның күрт ауытқуы.

Зерттеу әдістемесі математикалық статистика мен сенімділік теориясының классикалық аппаратына негізделген. Электрмен жабдықтау жүйелерінің (ЭЖЖ) - ӘЖ негізгі элементтерінің сенімділік модельдерін әзірлеу үшін Марковтың кездейсоқ процестері және процестер мен жүйелерді модельдеу теориясы қолданылды.

Практикалық құндылық жоспарында Қоршаған орта жағдайларын ескеретін модельдер әзірленді және жобалық және пайдалану практикасында пайдалану үшін ЭЖЖ сенімділігінің негізгі көрсеткіштері анықталды: істен шығудың орташа жұмыс уақыты, қалпына келтірудің орташа уақыты және жұмыс істемейтін күйге өтудің орташа саны. Кездейсоқ процестер деңгейінде ЭЖЖ сипаттайтын Марков модельдерін қолдану сыртқы ортаның әсер ету жағдайында жұмыс істейтін ЭЖЖ сенімділігін бағалау және болжау әдістерін қолдануға мүмкіндік береді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *Ауа-райы модельдері, сенімділік көрсеткіштері, күйлердің ықтималдығы, күй графигі және өтулер.*

MODELING OF RELIABILITY OF 6...10 KV OVERHEAD LINES FOR POWER SUPPLY OF OIL AND GAS FACILITIES

N.G. JUMAMUKHAMBETOV[1], Corresponding member of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of physical and mathematical sciences, professor, *nasikhan_d@mail.ru*
V.A. YASHKOV[2], Candidate of technical sciences, associate professor, *yashkov2409@mail.ru*
D.U. KULZHANOV[2], Doctor of physical and mathematical sciences, professor, *d.u.kulzhanov@mail.ru*
E.U. ARSTANALIEV[2], Candidate of technical sciences, associate professor, *esen-65@mail.ru*

[1]S. SEIFULLIN KAZAKH AGROTECHNICAL UNIVERSITY
62 Jenis Avenue, Nur-Sultan, 010011, Republic of Kazakhstan

[2]S. UTEBAYEV ATYRAU UNIVERSITY OF OIL AND GAS
45a Baimuhanova Street, Atyrau, 060027, Republic of Kazakhstan

The article considers the issues of assessing the impact of meteorological factors on the functioning of the most damaged overhead lines (OL) in the region under consideration, the modeling of which, taking into account the weather model, gives more realistic indicators, in the form of average residence time of the process in states, operating time for failure, recovery time, the number of transitions to an inoperable state. It is shown that from the point of view of the causes of damage to overhead lines leading to failure, the climatic impact is crucial: dust storms, pollution, sharp temperature fluctuations.

The research methodology was based on the classical apparatus of mathematical statistics and reliability theory. To develop models of reliability of the main elements of power supply systems (PSS) - overhead lines (OL), the theory of Markov random processes and modeling of processes and systems was used.

In terms of practical value, models have been developed that take into account environmental conditions and the main indicators of PSS reliability have been determined for use in design and operational practice: average time to failure, average recovery time and average number of transitions to an inoperable state. The use of Markov models describing PSS at the level of random processes makes it possible to apply in practice methods for assessing and predicting the reliability of PSS operating under the influence of the external environment.

KEY WORDS: *weather models, reliability indicators, probabilities of states, graph of states and transitions.*

Введение. Проблема надежности систем электроснабжения (СЭС) и их элементов связана с вопросами определения и оптимизации показателей надежности на стадиях проектирования, функционирования и развития. При этом метод моделирования с использованием Марковских процессов, являющихся наиболее изученным классом случайных процессов с дискретным множеством состояний и непрерывным временем, которыми характеризуются СЭС, имеет особо важное значение при решении задач исследования и оптимизации СЭС. А учет моделей погоды при разработке моделей надежности позволяет получить более реалистическую оценку надежности СЭС, функционирующих в сложных природно-климатических условиях (ПКУ).

Развитие и эксплуатация СЭС в значительной степени зависит от дальнейшего совершенствования методик их исследования и расчета надежности.

Актуальность вопросов надежности СЭС и неполная их изученность предопределяют необходимость дальнейшего исследования и разработки методов повышения и расчета надежности СЭС.

В настоящее время имеется большое количество научной и учебной литературы по вопросам надежности функционирования СЭС [1-5].

Разработкой научных методов решения задач надежности в электроэнергетике занимаются ученые и инженеры многих отечественных и зарубежных научно-исследовательских и проектных организаций, в том числе Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина, ТОО «Институт Казсель энергопроект», КазНИИ энергетики им. Ш. Чокина и др.

Кроме оптимизационных задач надежности возникает необходимость в определении показателей надежности, вычислении вероятности бесперебойного электроснабжения, обеспечении заданного уровня надежности.

Некоторые из этих задач нашли решение в ряде работ [6–10], однако, в целом, проблема оптимизации надежности СЭС решена не полностью.

Практически отсуствуют работы по исследованию и оптимизации СЭС, эксплуатирующихся в сложных ПКУ, специфика которых предъявляет повышение требования к надежности СЭС нефтегазовых объектов, которые являются открытыми. Проблема оптимизации надежности СЭС включает в себя большое число вопросов, которые не могут быть решены однозначно, а существующие мероприятия по повышению надежности СЭС без учета погодных условий в ряде случаев носят характер неполных и необоснованных рекомендаций, которые не удовлетворяют нуждам практики [11].

Таким образом:

1. На современном этапе для обеспечения и поддержания заданного уровня надежности СЭС необходима дальнейшая разработка и совершенствование методов исследования и оптимизации надежности СЭС.

2. Моделирование надежности элементов СЭС с учетом влияния внешней среды позволяет получить объективную оценку надежности.

3. При проектировании СЭС нефтегазовых регионов не достаточно учитывается специфика особенностей технологических процессов и ПКУ, в которых функционируют СЭС.

Материалы и методы исследования. В статье исследована надежность СЭС Атырауского нефтегазодобывающего района Казахстана.

Отличительная черта климата района – засушливость. Среднее число дней с относительной влажностью воздуха 30% – 22 – 30. Лето – жаркое и подолжительное, с возможной темпиратурой воздуха +43-+ 45° С и поверхности почвы до + 60° С.

Годовое число часов солнечного сияния – 2600 – 2700, среднее число грозовых дней в году – 8 – 10. Среднегодовое число дней с осадками – 2 – 6, среднегодовое количество осадков, которые носят ливневый характер, – до 14 мм.

Зима неустойчивая, теплая, с промерзанием почвы до 0,5 – 1 м. Число дней с температурой -20° С составляет 5 – 10. Метели наблюдается редко – 2 – 3 дня в году. Максимальная скорость ветра достигает 28 м/с (третий ветровой район по ПУЭ), по толщине стенок гололеда – второй район (10 мм), по степени загрезненности атмосферы – пятый.

По характеру растительного покрова обследуемый район отностится к пустынной зоне. Поверхность почвы представляет собой солончаковые пухляки, легко уносимые при скорости ветра 4–8 м/с, что создает пыльные бури от 18 до 50 дней в году, вызывающие нанос солончаковой пыли на элементы СЭС.

Анализ аварийных повреждений. Исследована надежность воздушных линий 6 – 10 кВ как наиболее повреждаемых и наибольших по количеству в составе элементов СЭС. В 2010 – 2020 гг., исследованы 1 840 км ВЛ. Для определения воздействия ПКУ на повреждаемость ВЛ все аварийные повреждения были разделены на отказы 1-го и 2-го родов.

1. Повреждения по причинам, связанным с особенностями ПКУ, а именно: дождь; снегопад; резкие колебания температуры; ветер и пыльные бури; дождь с ветром; дождь с грозой; гололед с ветром; загрязнение изоляции с последующим увлажнением.

2. Повреждения по причинам, не связанным с ПКУ, т. е. недостатки конструкции, монтажа, ремонта, эксплуатации, посторонние воздействия и др.

Такое разделение дало возможность применить анализ, результаты которого позволили качественно оценить влияние ПКУ на надежность СЭС [6, 8, 12].

Классификация отказов по повреждаемым узлам и причинам приведена в *таблицах 1* и *2*, по данным которых видно, что наиболее частым повреждением являются обрывы проводов из-за сильных ветров и пыльных бурь и несоответствия марки провода ПКУ.

Таблица 1 – **Классификация отказов по повреждаемым узлам**

Повреждения	Число/%
Схлестывание проводов	24/20,5
Повреждение изоляторов	20/17
Повреждение опор	24/20,5
Обрывы проводов	32/27,4
Сбои	16/13,7
Прочие и неустановленные	1/0,9

Таблица 2 – **Классификация отказов по причинам**

Причины	Число/процент
Природно-климатические воздействия	54/46,2
Конструктивные и технологические дефекты	13/11,1
Дефекты монтажа и ремонта	5/4,3
Неудовлетворительная эксплуатация	15/12,8
Посторонние воздействия	18/15,4
Прочие и неустановленные	12/10,2

Повреждения ВЛ, связанные с условиями внешней среды ПКУ, составляют 46,2%. Основными факторами являются загрязнение с последующим увлажнением, а также ветры и пыльные бури.

Априорный анализ влияния ПКУ на повреждаемость СЭС. Разделение всех аварийных повреждений по причинам (*таблица 2*), дало возможность применить априорный анализ надежности СЭС, результаты которого позволили более качественно оценить воздействие ПКУ на повреждаемость элементов СЭС.

Формализация полученной информации была осуществлена с помощью методов ранговой корреляции [13, 14].

Результаты анализа (*таблица 3*) показали, что наибольшее влияние на повреждаемость ВЛ 6 … 10 кВ – оказывает «загрязнение изоляции» и «пыльные бури» в результате наноса солончаковой пыли. Последующее увлажнение, вследствие суточных резких изменений температуры и выпадения осадков, появления росы, тумана, вызывает пробои или перекрытие линейной и подстанционной изоляции, чем и вызвана, как показано выше, высокая повреждаемость элементов СЭС, вследствие воздействия ПКУ (*таблица 3*).

Таблица 3 – **Повреждаемость элементов СЭС, вследствие воздействия ПКУ**

Наименование фактора	Индекс фактора	Ранг фактора ВЛ, кВ 6 … 10
Дождь…	$Ф_1$	20
Снегопад	$Ф_2$	15
Низкие температуры воздуха…	$Ф_3$	10
Высокие температуры воздуха…	$Ф_4$	10
Резкие колебания температуры…	$Ф_5$	20
Ветер…	$Ф_6$	35
Гололед	$Ф_7$	20
Дождь с грозой…	$Ф_8$	35
Дождь с ветром…	$Ф_9$	30
Гололед с ветром…	$Ф_{10}$	30
Загрязнение изоляции	$Ф_{11}$	40
Пыльные бури…	$Ф_{12}$	42
Слабые и агрессивные грунты…	$Ф_{13}$	10

Формирование модели погоды. Гистограмма, построенная по фактическим данным (*рисунок 1*) выявляет возрастание повреждаемости в весенний период, характеризующийся сильными ветрами и пыльными бурями. В результате на изоляторах появляются отложения солончаковой пыли, а последующее увлажнение вызывает перекрытие изоляторов или их пробой.

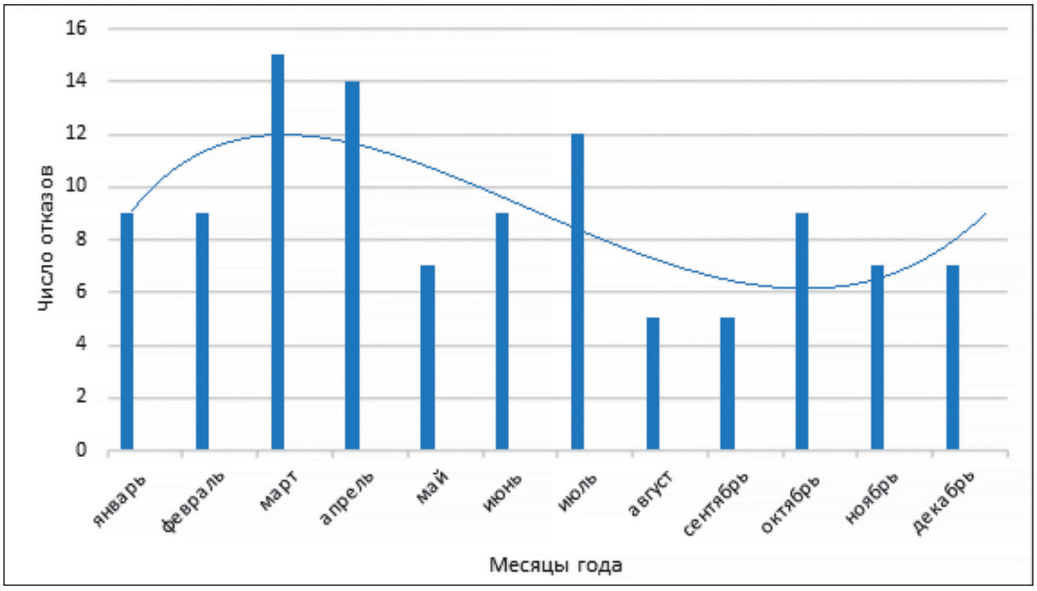

Рисунок 1 – **Гистограмма числа отказов в СЭС**

Гистограмма, изображенная на *рисунке 1* позволила представить модель погоды в виде Марковской модели в двух состояниях:

1) Q – нормальная погода Good;

2) B – неблагоприятная погода Bad.

Состоянию Q соответствуют отказы, вызываемые причинами неприродно-климатического характера; состоянию B – отказы по причине ПКУ, значительно большие по числу по сравнению с состоянием Q.

1. Состояние Q

ω^Q – интенсивность отказов (параметр потока отказов);

μ^Q – интенсивность восстановления;

T^Q – средняя продолжительность периода нормальной погоды;

λ^Q – интенсивность периода нормальной погоды.

$$\lambda^Q = \frac{1}{T^Q} \qquad (1)$$

2. Состояние B

ω^Q – интенсивность отказов (параметр потока отказов);

μ^Q – интенсивность восстановления;

T^Q – средняя продолжительность периода нормальной погоды.

$$\lambda^{B} = \frac{1}{T^{B}} \qquad (2)$$

Для упрощения моделей приняты следующие допущения, которые, как правило, недалеки от истины:

- циклы изменения погоды не зависимы от отказов и восстановления элементов;
- продолжительность периодов нормальной и неблагоприятной погоды подчиняется экспоненциальному закону;
- распределения, описывающие периоды времени нормальной и неблагоприятной погоды, а также периоды времени, отключенного состояния элементов имеют конечные средние значения;
- все виды неблагоприятной погоды объединяются в одном единственном состоянии;
- восстановление при состоянии В не производится.

Выбор показателей надежности. Надежность ВЛ, как и других элементов, достаточно полно характеризуется параметром потока отказов ω временем восстановления $t_{В}$.

Вместе с тем эти параметры недостаточны для нужд практики. Во-первых, для ВЛ, эксплуатирующийся в сложных ПКУ, важно знать характеристику процесса, происходящего в периоды всех состояний: среднее время пребывания процесса в состояниях, вероятность состояний.

Во-вторых, надежность – проблема экономическая. Использование показателей ω и $t_{В}$ не позволяет получить технико-экономическую оценку надежности объекта.

С этих позиций и выбирались показатели надежности для формирования моделей.

Рассмотрим некоторые зависимости, связывающие характеристики процесса и показатели надежности.

Средние наработка на отказ, времени восстановления и количество переходов в неработоспособное состояние определяются как среднее время пребывания процесса во множестве работоспособных состояний E^{+} после перехода процесса из множества неработоспособных состояний E^{-} в множество E^{+}.

Вероятность состояний определяется совместным решением двух уравнений:

$$\sum p_i = 1;\ p\,A = 0. \qquad (3)$$

где р – вектор строка вероятностей p_i; A – матрица интенсивностей переходов.

Экономическую оценку надежности дадим с помощью функции отказа (ФО)

$$ФО = F t_{В}\, y, \qquad (4)$$

где y – значение ущерба в единицу времени.

Модель надежности одноцепной ВЛ с учетом состояний погоды. Граф состояний и переходов в виде Марковской модели с двумя состояниями одноцепной ВЛ приведен на *рисунке 2*.

Исходя из указанных выше допущений переход из состояния 4 в состояние 2 отсутствует.

Работоспособное состояние $E^{+} = e_1, e_2$; неработоспособное $E^{-} = e_3, e_4$.

Матрица переходных вероятностей

1	2	3	4
-	$\frac{\lambda^Q}{\lambda^Q + \omega^Q}$	$\frac{\omega^Q}{\omega^Q + \lambda^Q}$	-
$\frac{\lambda^B}{\lambda^B + \omega^B}$	-	-	$\frac{\omega^B}{\omega^B + \lambda^B}$
$\frac{\lambda^Q}{\mu^Q + \lambda^Q}$	-	-	$\frac{\lambda^Q}{\lambda^Q + \mu^Q}$
-	$\frac{\mu^B}{\mu^B + \lambda^B}$	$\frac{\lambda^B}{\lambda^B + \mu^B}$	

Среднее время пребывания процесса в состоянии

$$\tau_i = \frac{1}{\lambda^Q+\omega^Q}, \frac{1}{\omega^B+\lambda^B}, \frac{1}{\lambda^Q+\mu^Q}, \frac{1}{\lambda^B+\mu^B}; \qquad (5)$$

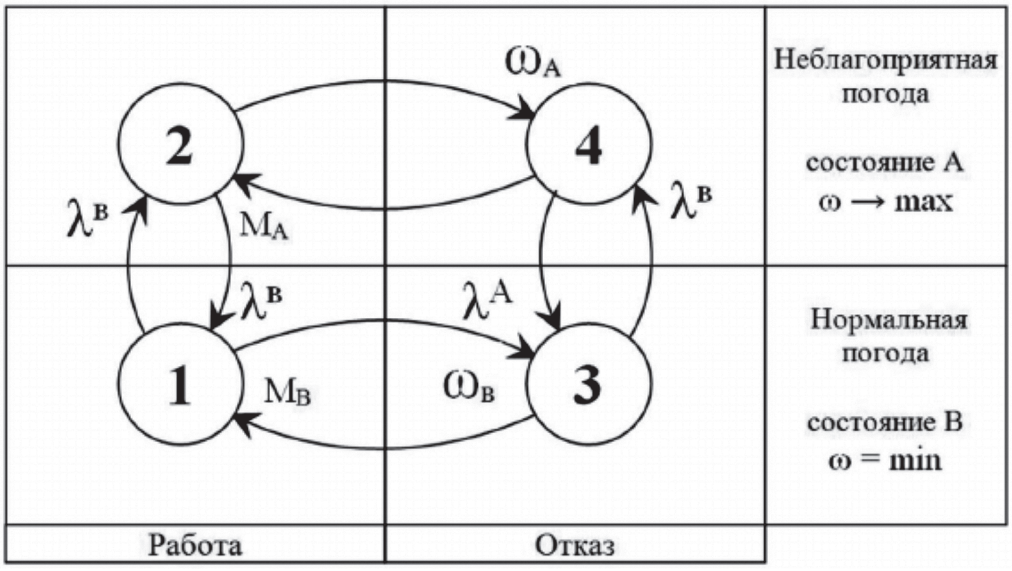

Рисунок 2 – **Граф состояний и переходов одноцепной ВЛ**

Выходные показатели, выраженные через характеристики процесса имеют вид: средняя наработка на отказ

$$T_o = \frac{\tau_1 + \tau_2}{p_{24} + p_{13}} \qquad (6)$$

среднее время восстановления

$$t_B = \frac{\tau_3 + \tau_4}{p_{31}} \qquad (7)$$

среднее количество переходов

$$F = \frac{p_{24}+p_{31}}{\tau_1+\tau_2} \qquad (8)$$

Для определения вероятностей состояний запишем матрицу интенсивностей переходов, исходя из графа состояний и переходов *(рисунок 4)*

Матрица интенсивностей переходов

1	2	3	4
$-(\lambda^Q+\omega^Q)$	λ^Q	ω^Q	-
λ^B	$-(\omega^B+\lambda^B)$	-	ω^B
μ^Q	-	$-(\lambda^Q+\mu^Q)$	λ^Q
-	μ^B	λ^B	$-(\lambda^B+\mu^B)$

Система линейных уравнений для определения вероятностей p_1 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} &-(\lambda^Q+\omega^Q)p_1+\lambda^Q p_2+\omega^Q p_3=0;\\ &\lambda^Q p_1-(\omega^B+\lambda^B)p_2+\omega^B p_4=0;\\ &\mu^Q p_1-(\lambda^Q+\mu^Q)p_3+\lambda^Q p_4=0;\\ &\mu^B p_2-\lambda^Q p_3-(\mu^B+\lambda^B)p_4=0. \end{aligned} \qquad (9)$$

Так как уравнения *(9)* не независимы, одно из них можно опустить, а вместо него добавить:

$$p_1+p_2+p_3+p_4=1. \qquad (10)$$

Решение системы *(9)* и *(10)* дают значения p_1, p_2, p_3, p_4.

В качестве примера в *таблицах 4* и *5* приведены результаты расчета показателей надежности ВЛ 6 кВ с учетом влияния внешней среды по изложенной выше методике.

Таблица 4 – **Расчет показателей надежности ВЛ 6 кВ с учетом влияния внешней среды**

Элемент	Состояние Q			Состояние В		
	T^Q, ч	ω^Q	μ^Q	$T^В$, ч	$\omega^В$	$\mu^В$
		1/ч			1/ч	
ВЛ 6кВ	200	$2\cdot10^{-4}$	0.1	5	$1\cdot10^{-3}$	0

Таблица 5 – **Расчет показателей надежности ВЛ 6 кВ с учетом влияния внешней среды**

Состояние	τ_i	T_o	$t_В$	F,1/ч $\cdot10^{-3}$	p_i
	ч				
1	192,3	3656	10,2	0,27	0,978
2	4,9				0,0213
3	9,5				0,0024
4	0,2				0,0004

Результаты и обсуждение. Исследования, проведенные за десятилетний период эксплуатации надежности наиболее повреждаемых элементов СЭС — ВЛ 6...10 кВ, позволили более качественно оценить влияние внешней среды на отказы и выявить их основные причины и повреждения элементов ВЛ.

Сравнение основных показателей надежности – параметра потока отказов и времени восстановления – с данными литературных источников показало превышение расчетных показателей на 20 – 30%, что подтверждает гипотезу о том, что при определении показателей надежности следует учитывать реальные условия эксплуатации СЭС [3, 6, 8, 15, 16].

Анализ факторов, определяющих повреждаемость ВЛ, выявил наиболее значимые природно-климатические факторы, к которым отнесены пыльные бури и загрязнение изоляции. Анализ изменения параметра потока отказов по годам позволил принять гипотезу об экспоненциальном законе распределения отказов, что соответствует реальному физическому процессу возникновения отказов, имеющих внезапный характер, обусловленный влиянием внешней среды. Принятие экспоненциального закона распределения параметра потока отказов и времени восстановления подтверждается тем, что закон характерен для сложных систем, состоящих из разнородных элементов с различными значениями параметра потока отказов и позволяет применить широко разработанный аппарат теории массового обслуживания и, в частности, аппарат однородных Марковских процессов [3, 6, 7, 15, 17].

Важно отметить, что исследования надежности никогда не могут предсказать или предотвратить отказы или аварии. Здесь следует стремиться получить такие результаты, которыми можно было бы интерпретировать и с их помощью понять существо проблемы.

ВЫВОДЫ

1. Интенсивность отказов ВЛ 6…10 кВ Атырауского нефтегазового региона зависит, в основном, от погодных условий и возрастает при неблагоприятной погоде, что позволяет представить модель погодных условий в двух состояниях.

2. При анализе надежности ВЛ 6…10 кВ СЭС их функционирование рассматривается как случайный процесс, который может быть достаточно строго описан дискретным Марковским процессом, что позволяет получить более реалистические результаты при оценке надежности СЭС.

3. Рассмотренный в статье принцип подхода к построению модели надежности с учетом влияния внешней среды и возможных допущений позволяет получить комплексную и более точную оценку надежности СЭС, эксплуатирующейся в условиях влияния метеофакторов.

4. В системных исследованиях в настоящее время математическое моделирование является определяющим видом моделирования согласно классификации методов моделирования и состоит в строгой формализованной доказанности и обосновано в статье.

5. Применение Марковских процессов при исследовании СЭС в условиях влияния ПКУ наиболее полно удовлетворяет потребностям математического моделирования надежности СЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1 Шпиганович А.А. Обеспечение надежности систем электроснабжения на базе информационно-аналитического анализа их функционирования. Докторская диссертация. Липецк, 2016. – 366 с.[Shpiganovich A.A. Obespechenie nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya na baze informacionno-analiticheskogo analiza ih funkcionirovaniya. Doktorskaya dissertaciya. Lipeck, 2016. – 366 s.]

2 Манов Н.А. и др. Методы и модели исследования надежности ЭЭС. – Сыктывкар:СГУ, 2010. – 292с. [Manov N.A. i dr. Metody i modeli issledovaniya nadezhnosti EES. – Syktyvkar:SGU, 2010. – 292 s.]

3 Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах/ Пер. с англ./ Под ред. Ю.И. Руденко. –М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с. [Endreni Dzh. Modelirovanie pri raschetah nadezhnosti v elektroenergeticheskih sistemah/ Per. s angl./ Pod red. YU.I. Rudenko. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 336 s.]

4 Петров А.В. Моделирование процессов и систем. – СПБ : Лань, 2015. – 288 с. [Petrov A.V. Modelirovanie processov i sistem. Uchebnoe posobie, –SPB : Lan', 2015. – 288 s.]

5 Воропай Н.И. Снижение рисков каскадных аварий в электроэнергетических системах. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2011. – 303 с. [Voropaj N.I. Snizhenie riskov kaskadnyh avarij v elektroenergeticheskih sistemah. – Novosibirsk: izd-vo SO RAN, 2011. – 303 s.]

6 Яшков В.А. Надежность систем электроснабжения: основы теории и оптимизация. —- Алматы: Ғылым, 2003. – 237 с. [YAshkov V.A. Nadezhnost' sistem elektrosnabzheniya: osnovy teorii i optimizaciya. – Almaty: Ғylym, 2003. – 237 s.]

7 Джумамухамбетов Н.Г. и др. Качество промышленного электроснабжения. – Алматы: ЭВЕРО, 2014. – 272 с. [Dzhumamuhambetov N.G.i dr. Kachestvo promyshlennogo elektrosnabzheniya. – Almaty : EVERO, 2014. – 272 s.]

8 Джумамухамбетов Н.Г. и др. Аналитический метод расчета узловой надежности систем промышленного электроснабжения с учетом влияния внешней среды // Вестник КазУТБ. – 2018. – №1. – С. 44–48. [Dzhumamuhambetov N.G. i dr. Analiticheskij metod rascheta uzlovoj nadezhnosti sistem promyshlennogo elektrosnabzheniya s uchetom vliyaniya vneshnej sredy // Vestnik KazUTB. – 2018. – №1. – S. 44–48.]

9 Доронина О.И., Шевченко Н.Ю., Бахтияров К.Н. Оценка надежности воздушных линий электропередачи с учетом климатических факторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – №9. – С. 107-113. [Doronina O.I., SHevchenko N.YU.,Bahtiyarov K.N. Ocenka nadezhnosti vozdushnyh linij elektroperedachi s uchetom klimaticheskih faktorov // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. – 2019. – №9. – S. 107-113.]

10 Чегодаева А.Ю. Система оценки надежности воздушных линий электропередач / Материалы международной научно-практической конференции «Развивая энергетическую повестку будущего». – Санкт-Петербург, 2021. – С. 376-379. [Chegodaeva A.Yu. Sistema ocenki nadezhnosti vozdushnyh linij elektroperedach / Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego». – Sankt-Peterburg, 2021. – S. 376-379.]

11 Джумамухамбетов Н.Г., Яшков В.А. Оценка надежности СЭС с использованием Марковских процессов // Нефть и газ. – 2014. – №4(82). – С. 35-40. [Dzhumamuhambetov N.G., YAshkov V.A. Ocenka nadezhnosti SES s ispol'zovaniem Markovskih processov // Neft' i gaz. – 2014. – №4(82). – S. 35–40.]

12 Яшков В.А. и др. Надежность электроснабжения в условиях резко континентального и засушливого климата на примере Атырауского региона / Международная научно-практическая конференция. Павлодар, 2020. – Т.1. – С. 73-79. [Yashkov V.A. i

dr. Nadezhnost' elektrosnabzheniya v usloviyah rezko kontinental'nogo i zasushlivogo klimata na primere Atyrauskogo regiona / Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Pavlodar, 2020. – T.1. – S. 73-79.]

13 Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Жуков Ю.С. Исследование влияния климатических факторов по повреждаемость электрооборудования на основе априорного анализа / Республиканский научно-технический семинар «Машины и нефтяное оборудование». – 1981. Вып. 6. – С. 71-78. [Men'shov B.G., Ershov M.S., ZHukov YU.S. Issledovanie vliyaniya klimaticheskih faktorov po povrezhdaemost' elektrooborudovaniya na osnove apriornogo analiza / Respublikanskij nauchno-tekhnicheskij seminar «Mashiny i neftyanoe oborudovanie». – 1981. Vyp. 6. – S. 71-78.]

14 Белешев С.Д., Гуревич О.С. Математические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 187 с. [Beleshev S.D., Gurevich O.S. Matematicheskie metody ekspertnyh ocenok. – M.: Statistika, 1980. – 187 s.]

15 Яшков В.А. и др. Моделирование надежности СПЭС в условиях сложных метофакторах / IV-я международная научно-техническая конференция. Турция, Стамбул, 2020. – С.118-123. [Yashkov V.A. i dr. Modelirovanie nadezhnosti SPES v usloviyah slozhnyh metofaktorah / IV-ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. Turciya, Stambul, 2020. – S. 118-123.]

16 Яшков В.А. и др. Анализ функционирования СЭС в условиях влияния метеофакторов с использованием инженерных методик расчета надежности ВЛ 35....110кВ / Международная научно-техническая конференция. Турция, Стамбул. 2021. – С.135-139. [Yashkov V.A. i dr. Analiz funkcionirovaniya SES v usloviyah vliyaniya meteofaktorov s ispol'zovaniem inzhenernyh metodik rascheta nadezhnosti VL 35....110kV / Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. Turciya, Stambul. 2021. – S. 135-139.]

17 Хомутов О.И. Моделирование систем обеспечения надежности и качества электроснабжения. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет, 2009. – 189 с. [Homutov O.I. Modelirovanie sistem obespecheniya nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya. – Barnaul: Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2009. – 189 s.]