Виктория Романовна Антропова
Victoria R. Antropova

*аспирант кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный
университет,
Тюмень, Россия*

Илья Сергеевич Сухачев
Ilya S. Sukhachev

*кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный
университет,
Тюмень, Россия*

Валерий Валентинович Сушков
Valery V. Sushkov

*доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергетика»,
Нижневартровский государственный
университет,
Нижневартровск, Россия*

Антон Сергеевич Мартьянов
Anton S. Martyanov

*кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный
университет,
Тюмень, Россия*

УДК 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-76-85

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Актуальность

Работа посвящена экономическому обоснованию технических решений по снижению последствий провалов и сбоев напряжения в системах электроснабжения на основе определения ущерба от кратковременных перебоев в электроснабжении. Получены функции плотности глубины падения напряжения и вероятности длительности падения напряжения в системе электроснабжения нефтяных месторождений, а также определена суммарная вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности. На основе разработанной Марковской модели кратковременных отказов электроснабжения получены вероятности нахождения системы электроснабжения в различных состояниях, что, в конечном итоге, позволит определить ущерб от аварийных простоев технологического оборудования.

Цель исследования

Исследовать вероятность останова технологического оборудования, в частности, погружных электродвигателей добычи нефти при внезапных перерывах электропитания и провести оценку ущерба для разных способов определения вероятности останова технологического оборудования.

Методы исследования

Для определения вероятности останова технологического оборудования от кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) использованы методы теории вероятности и математической статистики, теории Марковских процессов, теории устойчивости электромеханических систем и прикладные программы на ЭВМ.

Результаты

Разработана Марковская модель состояний системы электроснабжения и технологического оборудования, определена граница динамической устойчивости для установки электроприводного центробежного насоса и приведен способ оценки вероятности останова технологического оборудования в зависимости от глубины и длительности КНЭ.

Ключевые слова: ответственные нефтепромысловые потребители электроэнергии, погружной электродвигатель, нарушение электроснабжения, устойчивость, вероятностная оценка

DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC MODEL OF SHORT-TERM POWER SUPPLY INTERRUPTIONS

Relevance

The paper is devoted to the economic justification of technical solutions to reduce the consequences of voltage dips and interruptions in power supply systems based on the determination of damage from short-term power supply interruptions. The functions of the density of the voltage drop depth and the probability of the duration of the voltage drop in the power supply system of the oil fields are obtained, and the total probability of two independent events of a given depth and duration is determined. On the basis of the developed Markov model of short-term power supply failures, the probabilities of finding the power supply system in various states are obtained, which ultimately will allow determining the damage from emergency downtime of technological equipment.

Aim of research

To investigate the probability of shutdown of technological equipment, in particular, submersible electric motors for oil production during sudden power outages and assess the damage for different methods of determining the probability of shutdown of technological equipment.

Methods

To determine the probability of stopping a technological one from short-term power supply failures, the following methods were used: the theory of probability and mathematical statistics, the theory of Markov processes, the theory of stability of electromechanical systems and computer applications.

Results

A Markov model of the states of the power supply system and technological equipment has been developed, the boundary of dynamic stability for unit of an electric centrifugal pump has been determined, and a method for assessing the probability of stopping technological equipment depending on the depth and duration of short-term power failures has been presented.

Keywords: responsible oilfield power consumers, an electric submersible motor, power failure, stability, probabilistic assessment

Статистика показывает, что доля кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) от общего количества аварийных отключений в системе электроснабжения нефтяного месторождения может достигать 50 %, а недоотпуск нефти вследствие отключения нефтедобывающих скважин составляет 60 % [1–5]. Следовательно, задача повышения устойчивости асинхронных электродвигателей ответственных механизмов с преобразователями частоты, включая установки электрических центробежных насосов (УЭЦН), к провалам и прерываниям напряжения и экономическое обоснование технических решений по снижению числа их аварийных остановок являются актуальными. Экономическое обоснование технических решений требует определения ущерба от КНЭ, что невозможно осуществить без вероятностной оценки нарушений электроснабжения.

Ниже рассмотрены два вероятностных подхода к оценке ущерба от КНЭ.

Первый подход основан на вероятностной оценке кривой динамической устойчивости (КДУ), второй — на Марковской модели возникновения КНЭ.

Согласно ГОСТ 32144 и стандарту EN 50160 возмущения напряжения характеризуются следующими основными показателями:

1. глубиной (ΔU) — отклонением от опорного напряжения (U_{on} — в соответствии с ГОСТ 32144 считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания);
2. длительностью (τ) — временем возмущения;
3. видом (симметричные и несимметричные возмущения);
4. частотой возникновения.

Проведенный анализ надежности воздушных линий электропередачи (ВЛ) 6 и 35 кВ позволил выделить основные факторы, действующие на надежность ВЛ:

а) климатические факторы — грозовые перенапряжения, гололед, мокрый снег с ветром, схлест и обрыв проводов при ветре выше расчетного, падение деревьев на ВЛ из-за слабых грунтов, подвижки льда на озерах и т.п.;

б) случайные факторы — наезд транспортных средств или воздействие строительных механизмов, пожары, порывы водоводов и нефтепроводов, набросы на токоведущие части, бой изоляторов и другие действия посторонних лиц;

в) эксплуатационные факторы — некачественное проектирование и строительство ВЛ, старение оборудования, невыполнение в полном объеме требований и действующих правил проведения планово-предупредительных ремонтов, повреждение присоединенного оборудования и т.п.;

г) последняя группа факторов — неустановленные.

Распределение числа отказов ВЛ по месяцам представляет собой временной ряд y_i , в котором число отказов упорядочено по месяцам года в сети 35 и 6 кВ. На рисунке 1 приведено суммарное число отключений по месяцам для типового нефтегазодобывающего управления (НГДУ).

1 — кривая отключений;
2 — сглаженная кривая отключений

1 — tripping characteristic;
2 — smoothed tripping characteristic

Рисунок 1. Число аварийных отключений ВЛ

Figure 1. Number of emergency shutdowns of overhead lines

Как показал анализ аварийных отключений, пик отключений приходится на грозовой весенне-летний период.

Анализ КНЭ показал, что 90–95 % провалов напряжения, которые вызваны грозовой активностью, характеризуются относительно умеренной интенсивностью (остаточное напряжение при провалах порядка 40 % и длительность 0,15–1,10 с), при этом они затрагивают оба ввода и сопровождаются аварийными режимами, например, короткими замыканиями. Короткие замыкания являются внешними по отношению к объекту, в данном случае возможны прерывания напряжения длительностью до нескольких секунд, затрагивают они лишь один ввод.

В [6, 7] приведена классификация падений напряжения по причине возникновения, также в координатах ΔU и τ показаны наиболее вероятные области с характеристиками падений напряжения энергосистемы; аварии в удаленных сетях среднего напряжения; аварии в рассматриваемой сети среднего напряжения; пуск мощных электродвигателей; короткие замыкания; срабатывание высоковольтных предохранителей.

Одной из важнейших характеристик кратковременных нарушений электроснабжения является количество нарушений, попадающих в заданный диапазон глубины ΔU и длительности τ .

Для определения вероятностной характеристики кратковременных нарушений электроснабжения необходимо найти функции плотности распределения времени длительности кратковременных нарушений электроснабжения для заданного диапазона глубины ΔU и распределения глубины для заданного диапазона длительности $\Delta \tau$, которые, по сути, являются вероятностной моделью кратковременных нарушений электроснабжения. При этом определялись следующие параметры: проверялась статистическая

информация о глубине ΔU и длительности $\Delta \tau$ на достоверность и однородность, определялся минимальный объем выборки, проводилась проверка нулевой гипотезы о виде закона распределения с помощью критерия Колмогорова и критерия χ^2 , критерия Пирсона, производилась оценка параметров закона распределения и оценка вероятности КНЭ по выбранному закону распределения [8, 9].

На рисунке 2 показана гистограмма количества провалов и прерываний в зависимости от длительности для различных значений остаточного напряжения в процентах от опорного.

На рисунке 3 приведены функции плотности вероятности длительности провалов для различных диапазонов остаточного напряжения, которые позволяют определить вероятность отключения потребителя при нарушении устойчивости его работы.

Анализ гистограммы частот позволил выдвинуть нулевую гипотезу H_0 о функции распределения времени длительности КНЭ для заданного диапазона глубины провала напряжения, выраженной в процентах, ΔU и функции распределения глубины ΔU для заданного диапазона длительности $\Delta \tau$. Так, для смешанных кабельных и воздушных электрических сетей при остаточном напряжении $70 > U_{ост} \geq 40$ В эмпирическое распределение длительности КНЭ может быть описано законом Вейбулла-Гнеденко с функцией плотности $f(t) = 0.0039 \cdot t \cdot 0.35 \cdot \exp(-0.00297 \cdot t^{1.35})$ с параметрами $\alpha = 1,35$ и $\beta = 338$.

Критерий Колмогорова $D = 0,126$, значимость равна 0,156 степеней свободы $r = 39$. Вывод: «распределение не отличается от теоретического».

Критерий $\chi^2 = 4,77$, значимость равна 0,3117, степеней свободы $r = 4$.

Согласно результирующим уровням значимости двух критериев можно принять нулевую гипотезу H_0 распределения

Вейбулла-Гнеденко. При $U_{ост} = 0$ — нормальное.

Плотность вероятности глубины ΔU для заданного диапазона времени длительности КНЭ $0,2 < \tau \leq 0,4$ описана показательным законом с функцией плотности $f(t) = -6,7 \cdot \exp(-6,7 \cdot t)$ с параметрами $\alpha = 6,7$.

Критерий Колмогорова $D = 0,1259$, значимость равна $0,156$ степеней свободы $r = 39$.

Критерий $\chi^2 = 4,77$, значимость равна $0,3117$, степеней свободы $r = 4$.

На рисунке 1 приведены области изменения количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности, которые построены в стандартах по качеству электроэнергии: в ГОСТ 32144; IEEE std. 1346-1998; IEEE std. 1564-2014. Кроме того, в открытых и

закрытых статистических базах данных (БД) показателей качества электроэнергии, например, в базе данных «DPQ Database» от EPRI.

Зная плотность вероятности, по известной формуле можно определить вероятность глубины падения напряжения и вероятность длительности падения напряжения. Общая вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности определяется как произведение вероятностей этих событий.

В монографии Ершова М.С., Егорова А.В., Трифонова А.А. «Устойчивость промышленных электротехнических систем» предлагается для описания кривой динамической устойчивости (КДУ) при симметричных одноступенчатых провалах напряжения использовать следующую формулу:

Рисунок 2. Области изменения количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности

Figure 2. Areas of change in the number of voltage dips and interruptions in the coordinates of depth and duration

$$\tau(U_{res}) = \tau_0 \cdot \frac{1 - U_{res}}{1 - \frac{U_{res}}{U_{ss}}}, \quad (1)$$

где τ — глубина провала напряжения, с;
 τ_0 — запас устойчивости при прерывании напряжения до нуля, с;
 $U_{ост}$ — остаточное напряжение, о.е.;
 U_{cy} — напряжение статической устойчивости, о.е.

Ущерб от КНЭ для вышеуказанного случая определяется выражением

$$Y = Q \cdot C \cdot P,$$

где Q — объем добычи за время T ;

C — цена на нефть,

P — общая вероятность двух независимых событий заданной глубины и длительности.

Оценку вероятностей, характеризующих время пребывания в состояниях КНЭ, целесообразно определять на основе теории Марковских случайных процессов. Марковская модель КНЭ представлена на рисунке 3. Вероятности состояний как функции времени являются решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Известно, что если число состояний конечно, и переходы возможны из каждого состояния в каждое другое за один или несколько шагов (эти условия выполняются в нашем случае), то на достаточном удалении от начала функционирования существуют предельные (стационарные) вероятности состояний, не зависящие от времени и начального состояния системы. Стационарные вероятности равны среднему относительному времени пребывания системы в данном состоянии.

Значения стационарных вероятностей определяются как решение системы алгебраических уравнений, которые составлены для известного графа состояния (рисунок 3).

Интервалы времени нахождения системы электроснабжения при КНЭ в различных состояниях вычисляются по

результатам решения системы уравнений Колмогорова, составленной для пяти основных состояний системы электроснабжения.

Состояние системы электроснабжения:
 S1 — работоспособное состояние системы электроснабжения; S2 — состояние успешного самозапуска электродвигателя;
 S3 — состояние неуспешного самозапуска;
 S4 — состояние отказа устройства повышения динамической устойчивости электродвигателя технического обслуживания; S5 — состояние аварийно-восстановительного ремонта системы электроснабжения

Power supply system status:

S1 — operable state of the power supply system; S2 — state of successful self-starting of the electric motor; S3 — unsuccessful self-start state; S4 — failure state of the maintenance motor dynamic stability enhancer; S5 — the state of emergency recovery repair of the power supply system

Рисунок 3. Граф состояний системы электроснабжения

Figure 3. Power supply system state graph

Определяются следующие интенсивности переходов:

λ_{12} — интенсивность отказов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя успешен;

λ_{13} — интенсивность отказов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен;

λ_{14} — интенсивность отказов устройства повышения динамической устойчивости электродвигателей, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения;

λ_{15} — интенсивность перерывов системы электроснабжения, связанных с кратковременными нарушениями электроснабжения;

λ_{43} — интенсивность отказов системы электроснабжения, если произошел отказ устройства повышения динамической устойчивости электродвигателей, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен;

λ_{35} — интенсивность неуспешных самозапусков, приводящих к отключению системы электроснабжения;

μ_{21} — интенсивность восстановления системы электроснабжения (самозапуск электродвигателя успешен); самозапуск электродвигателя неуспешен);

μ_{31} — интенсивность восстановления (самозапуск электродвигателя неуспешен);

μ_{41} — интенсивность восстановления устройства повышения динамической устойчивости;

μ_{51} — интенсивность восстановления системы электроснабжения.

Приняты следующие показатели надежности системы электроснабжения:

t_{cy} — среднее время до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя успешен, ч;

t_{ny} — среднее время до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения, при этом самозапуск электродвигателя неуспешен, ч;

t_{on} — среднее время наработки на отказ устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_{cp} — среднее время работы системы электроснабжения до возникновения кратковременных нарушений электроснабжения;

t_{ony} — среднее время отключения системы электроснабжения при отказе устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_y — среднее время восстановления системы электроснабжения, если самозапуск электродвигателя успешен, ч;

t_n — среднее время восстановления системы электроснабжения, если самозапуск электродвигателя неуспешен, ч;

t_{yo} — среднее время восстановления устройства повышения динамической устойчивости, ч;

t_c — среднее время аварийного восстановления системы электроснабжения, ч.

Соответствующие интенсивности переходов (рисунок 3) определяются:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{cy}}; \lambda_{13} = \frac{1}{t_{ny}}; \lambda_{14} = \frac{1}{t_{on}}; \lambda_{15} = \frac{1}{t_{cp}}; \lambda_{43} = \frac{1}{t_{ony}};$$

$$\lambda_{35} = \frac{1}{t_{ny}}; \mu_{21} = \frac{1}{t_y}; \mu_{31} = \frac{1}{t_n}; \mu_{51} = \frac{1}{t_{yo}}; \mu_{41} = \frac{1}{t_c}.$$

В соответствии с графом состояний (рисунок 3) система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) \cdot P_1(t) + \mu_{21} \cdot P_2(t) + \\ + \mu_{31} \cdot P_3(t) + \mu_{41} \cdot P_4(t) + \mu_{51} \cdot P_5(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12} \cdot P_1(t) - \mu_{21} \cdot P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13} \cdot P_1(t) + \lambda_{43} \cdot P_4(t) - \lambda_{35} \cdot P_3(t) - \mu_{31} \cdot P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{14} \cdot P_1(t) - \lambda_{43} \cdot P_4(t) - \mu_{41} \cdot P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{15} \cdot P_1(t) + \lambda_{35} \cdot P_3(t) - \mu_{51} \cdot P_5(t). \end{cases} \quad (2)$$

Система линейных алгебраических уравнений переходов относительно ста-

ционарных вероятностей p_i , $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ имеет вид:

$$D(t, P) = \begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) \cdot P_1 + P_2 \cdot \mu_{21} + \\ + P_3 \cdot \mu_{31} + P_4 \cdot \mu_{41} + P_5 \cdot \mu_{51} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{12} - P_2 \cdot \mu_{21} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{13} + P_4 \cdot \lambda_{43} - P_3 \cdot \lambda_{35} - P_3 \cdot \mu_{31} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{14} - P_4 \cdot \lambda_{43} - P_4 \cdot \mu_{41} = 0; \\ P_1 \cdot \lambda_{15} + P_3 \cdot \lambda_{35} - P_5 \cdot \mu_{51} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений является однородной и должна решаться с условием нормировки:

$$\sum p_i = 1.$$

На рисунке 2 приведена граница динамической устойчивости для УЭЦН в координатах длительности и глубины провалов напряжения, из которой можно

по вышеуказанной методике определить вероятность останова УЭЦН и ущерб

$$Y = Q_{np} \cdot T_{сум.п} \cdot C,$$

где Q_{np} — суммарная производительность технологического оборудования во время простоя;

$T_{сум.п}$ — суммарное время пребывания системы энергоснабжения (СЭ) в различных состояниях, связанных с простоем технологического оборудования;

C — цена на нефть.

Решение системы дифференциальных уравнений определяется с помощью процедуры интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты при помощи программного средства символьной математики Derive:

$$\begin{aligned} P_1 &= (\mu_{21}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51}) / (\lambda_{14}(\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{51})) + \\ &+ (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}))) ; \\ P_2 &= (\lambda_{12}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51}) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}) + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51}\lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))) ; \\ P_3 &= (\mu_{21}(\lambda_{14}\lambda_{43} + \lambda_{13}(\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51})) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}) + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))) ; \\ P_4 &= (\lambda_{14}\mu_{21}((\lambda_{43} + \mu_{41})\mu_{51})) / (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31}) \times \\ &\times (\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}) + \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51}))) ; \\ P_5 &= (\mu_{21}(\lambda_{14}\lambda_{35}\lambda_{43} + \lambda_{13}\lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{41}) + \lambda_{15}(\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41}))) / \\ &/ (\lambda_{13}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{35} + \mu_{51}) + (\lambda_{35} + \mu_{31})(\lambda_{43} + \mu_{41})(\lambda_{15}\mu_{21} + (\lambda_{12} + \mu_{21})\mu_{51}) + \\ &+ \lambda_{14}\mu_{21}(\lambda_{43} + \mu_{31})\mu_{51} + \lambda_{35}(\lambda_{43} + \mu_{51})). \end{aligned} \quad (4)$$

Суммарное время пребывания СЭ в различных состояниях (кроме состояний работоспособности) определяется по выражению:

$$t_{\Sigma П} = \int_0^T p_3(x)dx + \int_0^T p_4(x)dx + \int_0^T p_5(x)dx. \quad (5)$$

Выражение (5) определяется с помощью типовых процедур программного

средства символьной математики Mathcad.

Время T следует понимать как период нахождения СЭ в работоспособном состоянии с полученным в данном расчете коэффициентом готовности. По условию это время должно быть больше нуля и меньше (или равно) правой границе интегрирования системы уравнений (параметр b).

Время восстановления работоспособности СЭ после КНЭ определяется по выражению:

$$t_5 = \int_0^T p_5(x) dx.$$

Путем изменения показателей надежности объекта и, в частности, показателей его ремонтпригодности (которые зависят от проведения диагностирования ЦНА следует добиваться минимизации функционала эффективности системы технического обслуживания (ТО) и затрат на эксплуатацию.

Таким образом, определено, что коэффициент готовности СЭ при КНЭ равен $K_r = 0,491$. При этом через $T = 1600$ ч сле-

дует проводить полное восстановление (регенерацию) СЭ продолжительностью работ, равной $t_4 = 110,574$ ч. Рассчитанная эффективность ТО определяется функционалом отношения, величина которого равна $J = 0,492$, который недостаточно высок.

Выводы

Таким образом, получены зависимости вероятности простоя технологического оборудования, которые позволяют экономически обосновать технические решения по снижению числа аварийных остановок применительно к провалам и прерываниям напряжения систем электроснабжения.

Список источников

1. Gayatri Sarman K.V.S.H., Madhu T., Mallikharjuna Prasad A. Fault Diagnosis of BLDC Drive Using Advanced Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System // *Soft Computing*. 2021. Vol. 25. No. 20. P. 12759-12774. DOI: 10.1007/s00500-021-06046-z.
2. Al-Janabi S., Rawat S., Patel A., Al-Shourbaji I. Design and Evaluation of a Hybrid System for Detection and Prediction of Faults in Electrical Transformers // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2015. 67. P. 324-335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.005.
3. Losev F.A., Prokopchuk I.A., Sushkov V.V. The Stability Assessment of Responsible Oilfield Power Consumers // 13th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2019, Omsk, 5 November 2019 — 7 November 2019. 2019. Art. No. 8944696, DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944696.
4. Лосев Ф.А., Сушков В.В., Тимошкин В.В., Мартыанов А.С. Повышение устойчивости погружных электродвигателей установок электрических центробежных насосов при провалах напряжения с помощью адаптивной защиты минимального напряжения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 10. С. 40-48.
5. Gladkikh T.D., Sushkov V.V. The Method of Distribution of Entering Emergency Restrictions Volumes of Power Consumption of Oilfield Consumers in Western Siberia When There Is a Power Shortage in the Power System // *Industrial Power Engineering*. 2010. No. 10. P. 23-26.
6. Сушков В.В., Матаев Н.Н., Кулаков С.Г., Емелина Н.М., Басырова Т.Д. Надежность, техническое обслуживание, ремонт и диагностика нефтегазового оборудования. СПб: Нестор, 2008. 296 с.
7. Sushkov V.V., Freishteter V.P., Pukhalsky A.A. The Assessment of Technological Systems Stability of Oil Production in Case of Power Supply Failures // *Industrial Power Engineering*. 2002. No. 6. P. 44-48.
8. Пат. № 2213270 РФ. Метод определения технического состояния погружных электроустановок для добычи нефти / Н.Н. Матаев, С.Г. Кулаков, С.А. Никончук. 2003.
9. Terzija V.V. Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006. Vol. 21. Issue 3. P. 1260-1266.

References

1. Gayatri Sarman K.V.S.H., Madhu T., Mallikharjuna Prasad A. Fault Diagnosis of BLDC Drive Using Advanced Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *Soft Computing*, 2021, Vol. 25, No. 20, pp. 12759-12774. DOI: 10.1007/s00500-021-06046-z.
2. Al-Janabi S., Rawat S., Patel A., Al-Shourbaji I. Design and Evaluation of a Hybrid System for Detection and Prediction of Faults in Electrical Transformers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 67, pp. 324-335. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.005.
3. Losev F.A., Prokopchuk I.A., Sushkov V.V. The Stability Assessment of Responsible Oilfield Power Consumers. *13th International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2019, Omsk, 5 November 2019 — 7 November 2019*. 2019. Art. No. 8944696, DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944696.
4. Losev F.A., Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Martyanov A.S. Povyshenie ustoichivosti pogruznykh elektrodvigateli ustanovok elektricheskikh tsentrobeznykh nasosov pri provalakh napryazheniya s pomoshch'yu adaptivnoi zashchity minimal'nogo napryazheniya [Increasing Stability of Electric Centrifugal Pumps in Submersible Electromotor to Voltage Sags with Adaptive Undervoltage Protection]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* — *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, Vol. 329, No. 10, pp. 40-48. [in Russian].
5. Gladkikh T.D., Sushkov V.V. The Method of Distribution of Entering Emergency Restrictions Volumes of Power Consumption of Oilfield Consumers in Western Siberia When There Is a Power Shortage in the Power System. *Industrial Power Engineering*, 2010, No. 10, pp. 23-26.
6. Sushkov V.V., Mataev N.N., Kulakov S.G., Emelina N.M., Basyrova T.D. *Nadezhnost', tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont i diagnostika neftegazopromyslovogo oborudovaniya* [Reliability, Maintenance, Repair and Diagnostics of Oil and Gas Field Equipment]. Saint-Petersburg, Nestor Publ., 2008. 296 p. [in Russian].
7. Sushkov V.V., Freishteter V.P., Pukhalsky A.A. The Assessment of Technological Systems Stability of Oil Production in Case of Power Supply Failures. *Industrial Power Engineering*, 2002, No. 6, pp. 44-48.
8. Mataev N.N., Kulakov S.G., Nikonchuk S.A. *Metod opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya pogruznykh elektroustanovok* [Method for Determining the Technical Condition of Electric Submersible Installations for Oil Production]. Patent No. 2213270 RF, 2003. [in Russian].
9. Terzija V.V. Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, Vol. 21, Issue 3, pp. 1260-1266.