

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ершов М.С., Журавлев С.М.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия
ershov.ms@gubkin.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в решении важной проблемы повышения устойчивости и надежности работы промышленных электротехнических систем. ЦЕЛЬЮ работы является сокращение числа вынужденных отключений электрооборудования при провалах напряжения, обусловленных короткими замыканиями, неизбежными при эксплуатации электрических сетей. Рассмотрены вопросы выбора параметров защиты минимального напряжения в промышленных электротехнических системах. В результате анализа эксплуатационных данных и имитационного моделирования провалов напряжения установлено, что при использовании защиты минимального напряжения (ЗМН) с независимыми характеристиками свыше 50% срабатываний защиты с отключением нагрузки происходит необоснованно. Основанием для отключения нагрузки является нарушение устойчивости электротехнической системы (ЭТС). МЕТОДЫ. Применение ЗМН с зависимой характеристикой времени срабатывания от величины остаточного напряжения, приближенной к границе устойчивости, снижает долю необоснованных срабатываний ЗМН, но не исключает их полностью. Для максимального снижения числа необоснованных срабатываний защиты необходима адаптация параметров характеристики ЗМН к зависящей от нагрузки и режима источника питания границе устойчивости. Для мониторинга параметров границы устойчивости ЭТС в процессе эксплуатации предложено применение алгоритмов искусственных нейронных сетей. РЕЗУЛЬТАТЫ. Апробированный алгоритм Левенберга-Марквардта (LM) показал приемлемую точность мониторинга устойчивости по измеряемым в ходе эксплуатации электрическим параметрам ЭТС. Показано, что применение зависимой характеристики ЗМН, параметры которой адаптируются к нагрузке и режиму источника питания с помощью алгоритмов нейронных сетей, позволяет примерно в два раза снизить число необоснованных отключений нагрузки и повысить устойчивость работы ЭТС непрерывных производств.

Ключевые слова: электротехническая система (ЭТС); провал напряжения; устойчивость; мониторинг; защита минимального напряжения; нейронная сеть; компьютерное моделирование.

Для цитирования: Ершов М.С., Журавлев С.М. Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга параметров устойчивости промышленной электротехнической системы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 41-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-41-52.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR MONITORING STABILITY PARAMETERS OF ELECTRICAL ENGINEERING SYSTEMS

Ershov M.S., Zhuravlev S.M.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia
ershov.ms@gubkin.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in solving the important problem of increasing the stability and reliability of electrical engineering systems (EES). The AIM of the work is to reduce the number of forced shutdowns of electrical equipment during voltage drops caused by short circuits inevitable during operation of electrical networks. The issues of selecting the parameters

of minimum voltage protection in electrical engineering systems are considered. As a result of the analysis of operational data and simulation modeling of voltage drops, it was found that when using minimum voltage protection (MVP) with independent characteristics, more than 50% of protection trips with load disconnection occur unreasonably. The basis for disconnecting the load is a violation of the stability of the electrical engineering system. METHODS. The use of MVP with a dependent response time characteristic on the residual voltage value close to the stability limit reduces the share of unreasonable MVP trips, but does not eliminate them completely. To minimize the number of unreasonable protection trips, it is necessary to adapt the parameters of the MVP characteristic to the stability limit dependent on the load and power source mode. To monitor the stability boundary parameters of the electrical engineering system during operation, it is proposed to use artificial neural network algorithms. RESULTS. The tested Levenberg-Marquardt (LM) algorithm showed sufficient accuracy of stability monitoring based on the parameters of the electrical engineering system measured during operation. It is shown that the use of the dependent characteristic of the MVP, the parameters of which are adapted to the load and power source mode using neural network algorithms, allows for approximately a twofold reduction in the number of unjustified load shutdowns and an increase in the stability of the electrical engineering system of continuous production.

Keywords: electrical engineering system (EES); voltage drop; stability; monitoring; minimum voltage protection; neural network; computer simulation.

For citation: Ershov M.S., Zhuravlev S.M. Application of artificial neural networks for monitoring stability parameters of electrical engineering systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (5): 41-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-41-52.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Наиболее частыми причинами массовых отключений электроприемников промышленных электротехнических систем (ЭТС) являются возмущения, обусловленные короткими замыканиями (КЗ) в электрических сетях и проявляющиеся в виде провалов напряжения различной глубины и длительности [1, 2]. На долю вынужденных остановов электродвигателей по причине провалов напряжения приходится свыше 65% от общего числа остановов, причем часто одновременно отключается группа электроприемников, что может повлечь нарушение технологического процесса. Особенно актуальна такая проблема для производств нефтедобывающих и нефтегазоперерабатывающих предприятий, вынужденные остановки которых сопровождаются не только большими экономическими потерями, но и тяжелыми экологическими последствиями, сопровождаемыми выбросами вредных веществ в окружающую среду [1, 3].

Провалы напряжения характеризуются глубиной Δu , отн. ед. и длительностью τ , с. Исходя из случайного характера провалов напряжения (см. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электроэнергии, п. 4.3) их параметры могут рассматриваться как случайные величины, подчиняющиеся смещенному экспоненциальному закону распределения:

$$f(\Delta u) = \frac{1}{\bar{\Delta u}} \exp\left(-\frac{\Delta u - du_{th}}{\bar{\Delta u}}\right); \quad (1)$$

$$f(\tau) = \frac{1}{\bar{\tau}} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{th}}{\bar{\tau}}\right), \quad (2)$$

где $\bar{\Delta u}$ и $\bar{\tau}$ – среднее значение глубины и длительности провалов напряжения; $du_{th} = 0,1$ отн. ед. и $d\tau_{th} = 0,05$ с – пороговые значения, с которых начинается фиксация провала напряжения и измерение его параметров. С глубиной провала напряжения однозначно связано остаточное напряжение $u = 1 - \Delta u$. Оценка параметров провалов напряжения осуществляется в соответствии с ГОСТ IEC 61000-4-30 – 2017 Методы измерений качества электрической энергии.

При критических провалах напряжения может происходить нарушение устойчивости электротехнической системы, не способной вернуться в исходное состояние после выбега двигателей при снижении напряжения: мощности источника недостаточно, чтобы одновременно разогнать все выбегающие двигатели. В качестве показателей устойчивости ЭТС при симметричных провалах напряжения могут использоваться такие показатели как напряжение статической устойчивости U_{st} , отн. ед. и время динамической устойчивости

при полном (до нуля) провале напряжения t_0 , с. В работах [1, 4-6] приведены программные средства, процедуры и примеры расчета параметров устойчивости промышленных ЭТС. Расчет параметров устойчивости позволяет определить границу динамической устойчивости ЭТС – зависимость допустимого времени провала напряжения от величины остаточного напряжения u :

$$t_{dn} = t_0 \frac{(1-u)}{\left(1 - \frac{u}{u_{st}}\right)}. \quad (3)$$

Граница устойчивости разделяет область возможных возмущений на две зоны: устойчивого состояния $(u, \tau) \in Y$; неустойчивого состояния $(u, \tau) \in N$. Координаты провала напряжения относятся к зоне неустойчивых состояний N , если выполняется условие $\tau > t_{dn}, \forall u = (0, u_{st})$. Эта зона находится выше границы устойчивости $t_{dn}(u)$.

Если же выполняется условие $\tau \leq t_{dn}, \forall u(0,1)$, то провал напряжения относится к зоне устойчивых состояний Y , которая находится ниже границы устойчивости. Таким образом, граница устойчивости разделяет область возможных возмущений на зоны критических и некритических возмущений. Граница устойчивости может быть использована для адаптации параметров релейной защиты, являющейся одним из перспективных направлений повышения надежности и устойчивости работы ЭТС [7-10].

Рассчитанные в результате компьютерного моделирования параметры устойчивости могут быть использованы для рационального выбора уставок защиты минимального напряжения (ЗМН), отключающего электроприемники ЭТС при критических провалах напряжения с последующим автоматизированным и ручным восстановлением работы электроприводов ЭТС. Для ЗМН с независимой характеристикой и фиксированными параметрами уставки U_{set} , отн. ед. и выдержки времени t_{set} , с рациональное условие выбора параметров защиты имеет вид:

$$U_{set} = U_{st}; t_{set} = t_0. \quad (4)$$

Выполнение условия (4), казалось бы, обеспечивает отключение нагрузки ЭТС только в критических ситуациях, однако это не совсем так [11]. Во-первых, расчет показателей устойчивости ЭТС обычно ведется исходя из максимального состава нагрузки (все электроприводы включены) и минимального режима источника питания (значение сопротивления системы – максимально). В реальности в процессе эксплуатации имеют место периодические включение и отключение части двигательной и статической нагрузки, а также изменение параметров источника питания [12]. Во-вторых, между кривой границы устойчивости и независимой характеристикой защиты минимального напряжения существует зона необоснованных отключений, при попадании параметров возмущений в которую устойчивость системы сохраняется, но защита срабатывает (все возмущения внутри характеристики ЗМН приводят к ее срабатыванию). Для ЗМН с независимой характеристикой выполнение условия (4) уменьшает зону необоснованных отключений двигателей, но не исключает ее полностью. Задача данной работы заключается в минимизации числа необоснованных отключений электрооборудования при возмущениях в электротехнических системах, проявляющихся в виде провалов напряжения, за счет адаптации параметров ЗМН к реальным режимам источника и нагрузки ЭТС.

В качестве математического аппарата для решения задачи мониторинга устойчивости ЭТС наиболее подходят алгоритмы искусственных нейронных сетей, получающие все большее распространение для решения задач контроля режимов и адаптации релейных защит электроэнергетических и промышленных электротехнических систем [13, 14], включая мониторинг устойчивости [15-17].

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование устойчивости и выбор ЗМН и ее параметров

Моделирование устойчивости осуществлялось на примере системы электроснабжения газоперерабатывающего завода [11]. В штатном режиме секционные выключатели системы на всех распределительных устройствах (РУ) разомкнуты, поэтому переходные процессы при провалах напряжения в подсистемах могут рассматриваться раздельно. Расчетная подсистема содержит десять высоковольтных асинхронных двигателей, включая четыре двигателя мощностью 315 кВт; один двигатель мощностью 3150 кВт и пять двигателей мощностью 4000 кВт, распределенных по трем

распределительным пунктам РП-10 кВ, подключенным к РУ-10 кВ ГПП кабельными линиями длиной до 1 км. Низковольтная нагрузка состоит из восьми эквивалентных асинхронных двигателей мощностью 1250 кВт и статической (нагреватели, освещение) низковольтной нагрузки общей мощностью 1500 кВт, подключенных через восемь трансформаторов мощностью 1600 кВА. Вся нагрузка питается через трансформатор ТРДН-40-110-10 с расщепленной обмоткой мощностью 40 МВА, напряжением 115/10,5 кВ. Эквивалентные параметры источника питания составили: ЭДС $E_c = 10800$ В; сопротивление

в максимальном и минимальном режимах питающей системы:
1) $Z_c = j0,25$ Ом и 2) $Z_c = j0,35$ Ом, соответственно.

Согласно итерационным процедурам расчета устойчивости, представленным в работах [1, 4], напряжение статической устойчивости ЭТС u_{st} определялось последовательным снижением ЭДС системы с шагом 100 В до возникновения лавины напряжения – самопроизвольного снижения напряжения в узлах системы. Таким образом, точность определения напряжения статической устойчивости составляет $\pm 0,01$ отн. ед. Процедура расчета времени динамической устойчивости t_0 определяется последовательным увеличением длительности полных провалов напряжения до тех пор, пока система не будет возвращаться в исходное состояние. Точность определения времени динамической устойчивости принята равной $\pm 0,01$ с. В качестве контролируемых параметров при расчетах параметров устойчивости выбиралось напряжение на шинах РУ-10 ГПП, токи и скорости двигателей. Для примера на рисунках 1 и 2 представлены графики напряжения на шинах, а также ток и скорость одного из асинхронных двигателей мощностью 4 МВт.

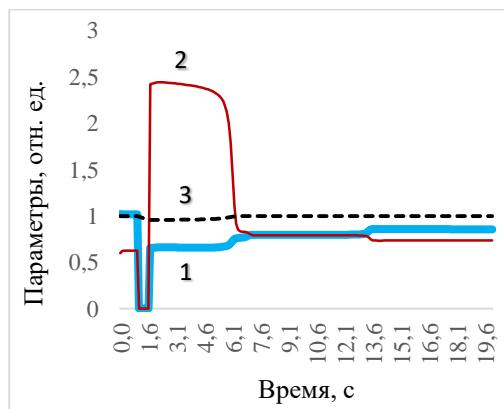


Рис. 1. Графики: 1 – напряжение; 2 – ток; 3 – скорость двигателя при длительности провала напряжения $\tau = 0,4$ с

Fig. 1. Graphs: 1 – voltage; 2 – current; 3 – motor speed with voltage dip duration $\tau = 0,4$ s

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

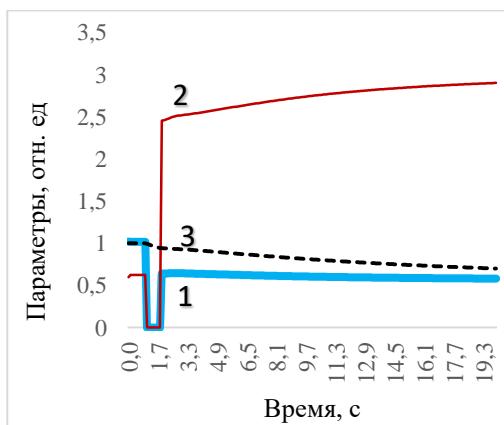


Рис. 2. Графики: 1 – напряжение; 2 – ток; 3 – скорость двигателя при длительности провала напряжения $\tau = 0,8$ с

Fig. 2. Graphs: 1 – voltage; 2 – current; 3 – motor speed with voltage dip duration $\tau = 0,8$ s

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для моделирования выбрано шесть режимов нагрузки ЭТС. В первом режиме нагрузка максимальная, включены все двигатели ЭТС, в последующих режимах нагрузка

уменьшалась за счет последовательного отключения части электродвигателей. В ходе моделирования контролировались значения: напряжения U , тока I , активной P и реактивной Q мощности на вводе РУ-10 кВ. В исходном номинальном режиме при включении всех электродвигателей ЭТС и значении реактивного сопротивления системы равном $j0,25$ Ом значения параметров устойчивости, определяющих ее границу, составили: $u_{cy} = 0,754$ отн.ед.; $t_0 = 0,52$ с. В минимальном по мощности режиме сопротивление источника питания равно $j0,38$ Ом, при этом значения параметров устойчивости в режиме полной нагрузки составляют: $u_{cy} = 0,786$ отн.ед.; $t_0 = 0,40$ с.

По результатам расчетов, представленным в таблице, можно видеть, что при уменьшении тока нагрузки изменяются контролируемые параметры ЭТС, а также параметры устойчивости: напряжение статической устойчивости u_{cy} уменьшается, а время динамической устойчивости t_0 увеличивается.

Для примера на рисунках 3 и 4 приведены зависимости показателей устойчивости от тока на вводе РУ-10 кВ системы. Зависимости построены для двух вариантов значения сопротивления питающей сети: 1 – $j0,25$ Ом и 2 – $j0,38$ Ом. По мере уменьшения мощности источника показатели устойчивости ЭТС ухудшаются: увеличивается напряжение статической устойчивости и уменьшается время динамической устойчивости.

Таблица
Table

Результаты компьютерного моделирования устойчивости ЭТС

Results of computer simulation of the stability of the EES

Параметры	Режимы работы					
	1	2	3	4	5	6
Сопротивление источника питания $Z_c = j0,25$ Ом						
I , А	1419	1278	1018	598	544	367
U , В	10198	10265	10371	10556	10570	10637
P , кВт	22955	20835	16649	9990	9012	6114
Q , квар	12038	10735	8678	5035	4763	3429
u_{cy} , отн. ед.	0,7543	0,7382	0,7241	0,6813	0,6791	0,6702
t_0 , с	0,521	0,592	0,731	1,381	1,412	1,761
Сопротивление источника питания $Z_c = j0,38$ Ом						
I , А	1440	1294	1027	601	546	371
U , В	10026	10115	10254	10492	10510	10595
P , кВт	22941	20822	16640	9978	9002	6105
Q , квар	11997	10691	8642	5014	4741	3414
u_{cy} , отн. ед.	0,7861	0,7662	0,7473	0,6942	0,6921	0,6791
t_0 , с	0,401	0,461	0,582	1,051	1,121	1,412

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

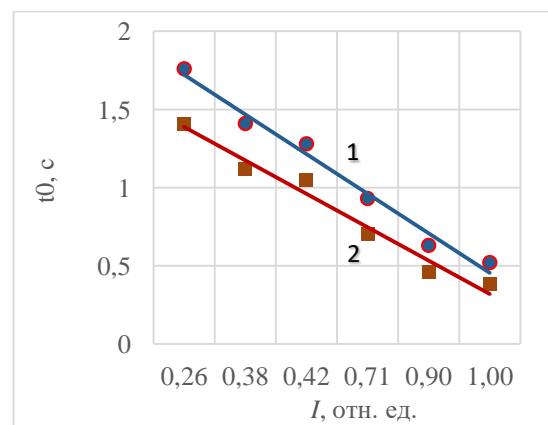


Рис. 3. Зависимость времени динамической устойчивости от тока нагрузки: $Z_c = j0,25$ Ом; $Z_c = j0,38$ Ом *Fig. 3. Dependence of dynamic stability time on load current: $Z_c = j0,25$ Ом; $Z_c = j0,38$ Ом*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

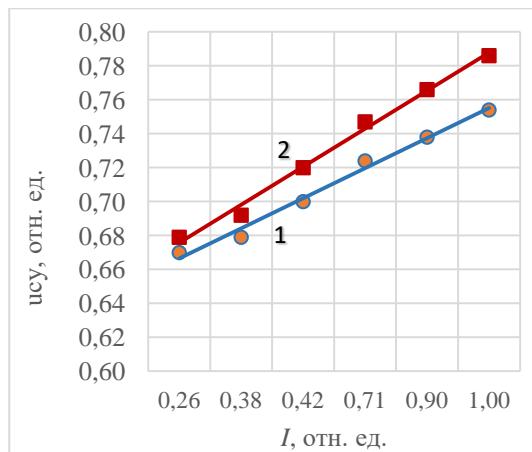


Рис. 4. Зависимость напряжения статической устойчивости от тока нагрузки: $Z_c = j0,25 \text{ Ом}$; $Z_e = j0,38 \text{ Ом}$

Fig. 4. Dependence of static stability voltage on load current: $Z_c = j0,25 \text{ Ом}$; $Z_e = j0,38 \text{ Ом}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом изменение режимов нагрузки ЭТС приводит к изменению параметров устойчивости нагрузки. На рисунке 5 показаны графики границ устойчивости (выражение 3) ЭТС при различных режимах работы и сопротивлении системы $Z_c = j0,25 \text{ Ом}$, а также имитация координат провалов напряжения в течение пяти лет. Имитация провалов напряжения выполнена согласно выражениям (1) и (2) для параметров плотности вероятности $\Delta u = 0,4$ отн.ед; $\tau=0,3$ с. В результате получили, что число критических провалов напряжения, попадающих в зону защиты ЗМН (характеристика 3) составило 148 случаев, что соответствует вероятности 0,37. Число попаданий в зону неустойчивых состояний N границы 1 равно 68, при вероятности 0,17. Число попаданий в зону необоснованных срабатываний ЗМН в режиме нагрузки 1 составляет 80, при вероятности 0,2. Если ЭТС работает в минимальном из рассмотренных режимов нагрузки, а ЗМН настроена на «худший случай» – максимальную нагрузку, то число необоснованных отключений составит 144 при вероятности 0,36.

Исходя из полученных результатов можно заключить: 1) при использовании ЗМН с независимой характеристикой даже при максимальной нагрузке число необоснованных отключений может быть достаточно большим; 2) настройка параметров защиты минимального напряжения на «худший случай» – максимальную нагрузку ЭТС и минимальный режим источника может приводить к частым необоснованным отключениям электроприводов системы.

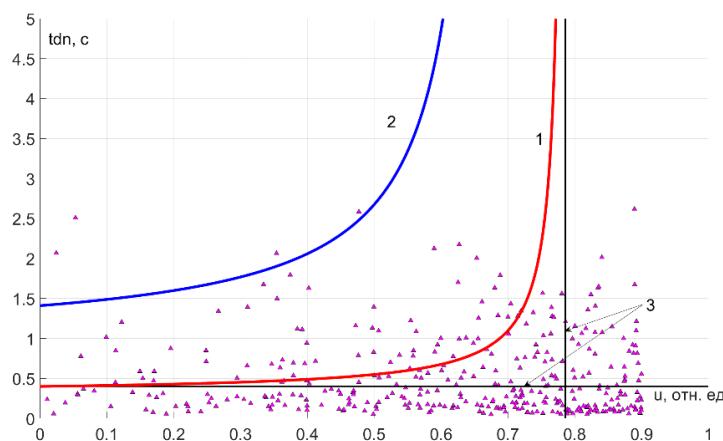


Рис. 5. Имитация провалов напряжения и границы устойчивости: 1 – режим 1; 2 – режим 6; 3 – характеристика независимой ЗМН

Fig. 5. Simulation of voltage dips and stability limits: 1 – mode 1; 2 – mode 6; 3 – characteristic of independent MVP

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании первого вывода можно сделать вывод, что для снижения числа необоснованных отключений ЭТС целесообразно использовать ЗМН с зависимой

характеристикой. В качестве зависимых характеристик ЗМН может использоваться гиперболическая характеристика, которая имеет вид:

$$t_{set} = \frac{1}{1 - (u / u_{set})^2}. \quad (5)$$

Кроме перечисленных зависимых характеристик в цифровых реле возможен табличный ввод характеристик или введение произвольной формулы, например, соответствующей границе устойчивости (3).

Исходя из второго вывода следует, что для повышения эффективности ЗМН требуется адаптация настройки ее параметров в зависимости от нагрузки и параметров источника питания, которую можно осуществить с помощью искусственных нейронных сетей.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Мониторинг параметров устойчивости с помощью искусственных нейронных сетей

Состояние ЭТС и ее свойства, включая устойчивость – способность восстанавливать исходное состояние после возмущения, определяется набором параметров. Для рассматриваемой задачи в качестве таких параметров выбраны электрические величины, подлежащие непрерывному измерению: напряжение основного узла (шины РУ-10 кВ ГПП) U , ток I , активная P и реактивная Q мощность на входе системы. Эти показатели могут быть получены в режиме on-line наблюдения с цифровых терминалов релейных защит, установленных в распределительном устройстве.

Для моделирования использовалась нейронная сеть (НС), включающая: входы (X_i) ; первый слой скрытых нейронов (h_{1k}), второй слой скрытых нейронов (h_{2k}), слой выходных нейронов – выходов (Y_l) Число входных величин равно четырем – ($i = 1..4$). Число первого скрытого слоя нейронов может изменяться от 1 и выше. Число второго скрытого слоя фиксировано и равно числу выходных величин – 2. Пример схемы нейронной сети при четырех нейронах первого скрытого слоя приведен на рисунке 6.

Система уравнений для скрытых слоев нейронов и выходных величин имеет вид:

$$\begin{aligned} h_{1k} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{ki}^{(1)} X_i + b_k^{(1)} \right); \\ h_{21} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{1k}^{(2)} h_{1k} + b_1^{(2)} \right); \\ h_{22} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{2k}^{(1)} h_{1k} + b_2^{(2)} \right); \\ Y_1 &= g \left(w_{11}^{(3)} h_{21} + w_{12}^{(3)} h_{22} + b_1^{(3)} \right); \\ Y_2 &= g \left(w_{21}^{(3)} h_{21} + w_{22}^{(3)} h_{22} + b_2^{(3)} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $w_{1k}^{(1)}$ – веса между i -ым входом и k -м нейроном первого слоя; $w_{lk}^{(2)}$ – веса между k -м номером нейрона в первом слое и l -м номером нейрона во втором скрытом слое; $w_{jl}^{(3)}$ – веса между l -м номером нейрона во втором скрытом слое и j -м выходом; $b_i^{(n)}$ – коэффициенты смещения для скрытых слоев и выходного слоя, $n = 1..3$. $f = 1/(1+e^{-x})$ – функция активации для скрытых слоев; g – линейная функция активации для выходного слоя.

Обучение нейронной сети осуществляется по алгоритму Левенберга-Марквардта (LM) [16, 17], заключающегося в подборе вектора w весовых коэффициентов сочетанием градиентного спуска и метода Гаусса-Ньютона, адаптивно переключаясь между ними для эффективной минимизации функции ошибки (MSE – Mean Squared Error), вида

$$MSE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(x_i, w))^2, \quad (7)$$

где Y_i – целевое значение выхода; $f(x_i, w)$ – предсказание модели для входа x_i .

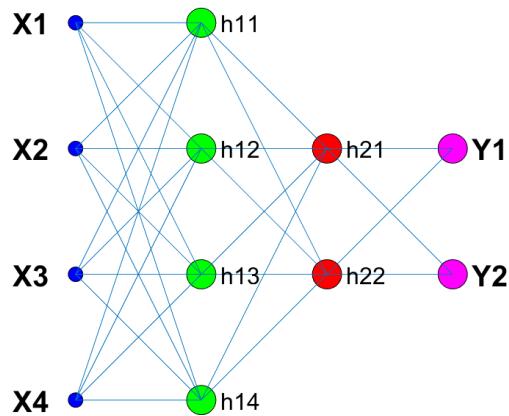


Рис. 6. Пример схемы нейронной сети

Fig. 6. Example of a neural network diagram

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Вычисление ошибки осуществляется по нормализованным значениям выходных величин, определяемых по алгоритму минимаксной нормализации с симметричным диапазоном, что ускоряет обучение. Чтобы минимизировать ошибки округления, веса w вычисляются с точностью до 20 знаков.

Используемые для настройки нейронной сети данные, соответствующие режимам ЭТС при максимальном и минимальном режимах источника питания, разделены на данные для тренировки, валидации и тестирования в соотношении 70/15/15%. В ходе обучения (training) подбираются весовые коэффициенты. В ходе проверки (validation) подбираются параметры управления, включая шаг изменения коэффициентов и число полных прогонов – эпох (Epochs). В ходе тестирования (testing) оцениваются ошибки на базе независимых данных, не участвующих в обучении. Как показано на рисунке 7, обучение останавливается на 13 эпохе, при этом ошибка проверки минимальна, ошибки обучения, проверки и тестирования близки к нулю при приемлемом соотношении ошибок между тестированием и обучением и умеренном разрыве между ошибками обучения и проверки, свидетельствующем о приемлемом уровне обучения НС. Распределение ошибок, вычисленных по выражению (7), приведено на рисунке 8.

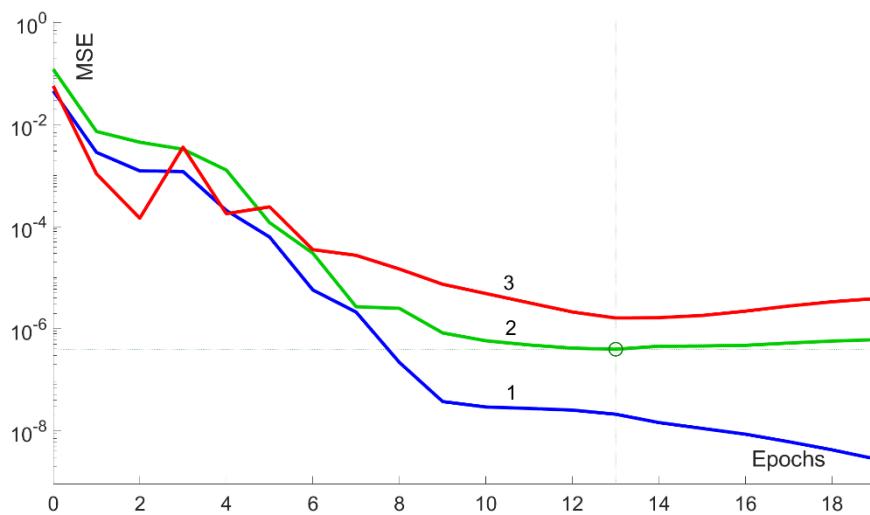


Рис. 7. Результат обучения НС: 1 – тренировка; 2 – валидация; 3 – тестирование

Fig. 7. Result of NN training: 1 – training; 2 – validation; 3 – testing

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

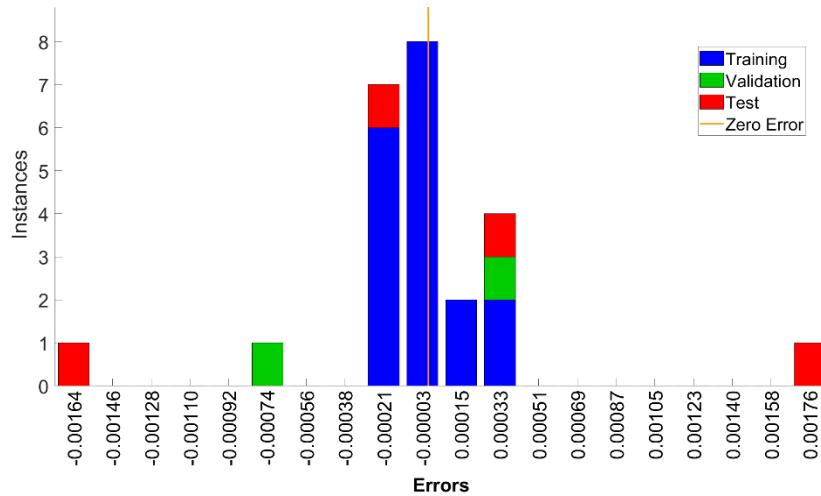


Рис. 8. Гистограмма ошибок

Fig. 8. Error histogram

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Результаты обучения сохранены в виде скрипта, который далее использовался для проверки работы НС на новых исходных данных. Запуск натренированной сети позволил исследовать точность адаптации параметров защиты минимального напряжения к режимам ЭТС и источника питания. Характерные значения ошибок в определении параметров ЗМН по условию (4) отражены на рисунке 9.

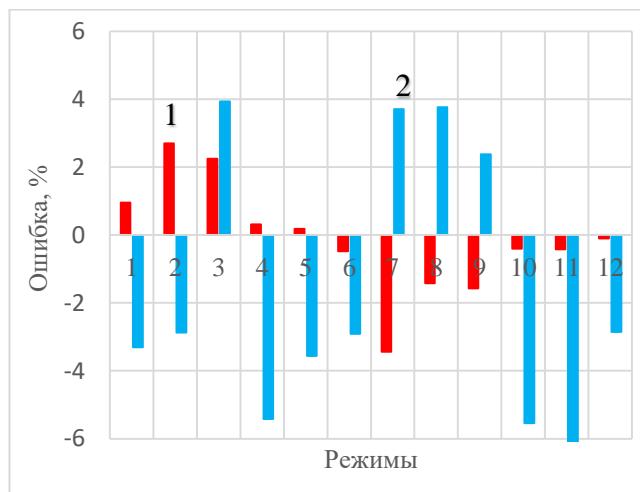


Рис. 9. Ошибки адаптации параметров ЗМН: 1 – ошибка уставки напряжения; 2 – выдержка времени

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Значение ошибок в определении уставки напряжения ЗМН по алгоритму LM находится в пределах 4%; значения ошибок выдержки времени может достигать 6%, что в целом приемлемо, но требует дополнительных исследований других методов обучения нейронных сетей. На данном этапе, чтобы избежать несрабатывания защиты в условиях потери устойчивости, можно рекомендовать введение десятипроцентных поправочных коэффициентов при определении параметров ЗМН:

$$u_{set} = 1,1 \cdot \hat{u}_{st}; \quad t_{set} = 0,9 \cdot \hat{t}_0, \quad (8)$$

где \hat{u}_{st} и \hat{t}_0 – оценки параметров устойчивости, полученные с помощью НС.

Имитация провалов напряжения по вышеупомянутой методике показала, что применение зависимой характеристики ЗМН, параметры которой адаптируются к нагрузке и режиму источника питания с помощью алгоритмов НС, позволяет примерно в два раза снизить число необоснованных отключений нагрузки ЭТС.

Заключение (Conclusion)

В результате исследований подтверждено, что значительная часть отключений электрооборудования при возмущениях в электрических сетях промышленных

электротехнических систем является излишней: часто отключения происходят при некритичных провалах напряжения, при которых сохраняется устойчивость ЭТС. Такие отключения в многомашинных системах могут приводить к остановам технологических процессов, что особенно нежелательно для непрерывных производств, характерных для объектов добычи, транспорта и переработки нефти и газа. Сложность выбора рациональных параметров защиты минимального напряжения, реагирующих на провалы напряжения, заключается в изменении состава электродвигательной нагрузки и параметров источников питания в процессе эксплуатации ЭТС. Предложены и реализованы в результате компьютерного моделирования принципы мониторинга устойчивости ЭТС по контролируемым в процессе эксплуатации электрическим параметрам (напряжению, току, мощности) и их соответствия установленным в ходе предварительных расчетов параметрам устойчивости. Для реализации мониторинга рекомендованы и апробированы на примере алгоритмы нейронных сетей Левенберга-Марквардта, позволяющие определить параметры устойчивости по измеряемым электрическим параметрам системы. Результаты исследования подтвердили точность мониторинга параметров устойчивости ЭТС в пределах $\pm 10\%$. В дальнейшем целесообразно сравнить использованные алгоритмы и другие известные алгоритмы нейронных сетей.

В результате имитационного компьютерного моделирования установлено, что мониторинг устойчивости и адаптация параметров защиты минимального напряжения к текущим параметрам устойчивости позволит значительно сократить число необоснованных массовых отключений электроприемников ЭТС при провалах напряжения, обусловленных возмущениями в электрических сетях, что особенно актуально для непрерывных производств.

Литература

1. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. – 319 с.
2. Дзюн Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2 49-62.
3. Сагтаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.
4. Ершов М.С., Комков А.Н., Блюк В.В. Процедуры расчета показателей устойчивости многомашинных электротехнических систем промышленных производств/Промышленная энергетика. – 2021, №9. – С. 18-26.
5. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Models and algorithms for quick calculation of electromechanical transition process of multi-machine electrotechnical systems/ Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. Р. 686-689.
6. Галеева Р.У., Куксов С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.
7. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // IET Power Electron. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696.
8. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6 102-123.
9. Шарыгин М. В., Вуколов В. Ю., Петров А. А. Разработка алгоритма автоматической адаптации параметров срабатывания многомерной интеллектуальной релейной защиты к конфигурации распределительных электрических сетей // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 65–78. DOI: 10.24411/2227-9407- 2020-10106.
10. Viktorovich, V.M., Vasiliyevich, D.A., Vladimirovich, M.K. and Nikolaevich, S.V. Comprehensive Automation of Microprocessor Protection Relay Terminals Operated on AC Railways// Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. №10. – Р/ 491-503. <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.102037>.

11. Ершов М.С., Ноздря Е.Г. Адаптация показателей и идентификация нарушения устойчивости промышленных электротехнических систем/ Промышленная энергетика. 2018. -№12. – С. 2-5.
12. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В. Определение эквивалентных параметров питающей сети для расчета тока короткого замыкания узла нагрузки/Электричество. – 1993. - №10. – С. 19-22.
13. Ting Yang, Xiyang Qian and Liqing Ren. Application of Artificial Intelligence Algorithm in Relay Protection of Distribution Network// International Transactions on Electrical Energy Systems Volume 2022, Article ID 7138367, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2022/713836714>.
14. Zozan Saadallah Hussain, Ahmed J. Ali, Ahmed A. Allu, Rakan Khalil Antar. Improvement of protection relay with a single-phase auto reclosing mechanism based on artificial neural network// International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 505-514. ISSN: 2088-8694. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp505-514 .
15. Huo, C., Rong, X.-T., Huang, Z.-W., Han, Z.-X., Fan, Y.-P., Wang, Z.-J., & Fu, J.-R. (2025). A Novel Static Voltage Stability Region Boundary Generation Method Combining Analytics with Predictive Correction. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(5), 2977–2991. <https://doi.org/10.1007/s42835-025-02206-5>
16. Ahmad, H., Yousif, M., Shah, M., & Ullah, N. (2023). Monitoring Transient Stability in Electric Power Systems Using a Hybrid Model of Convolutional Neural Network and Random Forest. *Electric Power Components and Systems*, 52(6), 946–958. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2237034>
17. Umair Shahzad. Probabilistic Transient Stability Assessment of Power Systems Using Artificial Neural Network// Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEEECCS. 2021, Volume 8, Issue 27, pages 35-42.

Авторы публикации

Ершов Михаил Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7772-0095>. ershov.ms@gubkin.ru

Журавлев Семен Михайлович – аспирант кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0009-000-2502-9414>. semen386z@gmail.com

References

1. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Stability of industrial electrical systems. – M.: Nedra Publishing House LLC, 2010. – 319 p.
2. Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (2): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903 2025-27-2-49-62.
3. Sattarov RR, Garafutdinov RR. research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(6):92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.
4. Ershov M.S., Komkov A.N., Blyuk V.V. Procedures for calculating stability indicators of multi-machine electrical systems of industrial production / Industrial Power Engineering. - 2021, No. 9. - P. 18-26.
5. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Models and algorithms for quick calculation of electromechanical transition process of multi-machine electrotechnical systems/ Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. P. 686-689.
6. Galeeva RU, Kuksov SV. Algorithm for simulating the self-starting of a group of asynchronous electric motors with a short-circulated rotor. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(3):181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.
7. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // IET Power Electron. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696.
8. Ivanov IYu., Novokreshchenov VV., Ivanova VR. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(6):102-123. doi:10.30724/1998 9903-2022-24-6-102-123.

9. Sharygin M. V., Vukolov V. Y., Petrov A. A. Algorithm of automatic adaptation of multidimensional relay protection setpoints to the configurable power distribution network // Bulletin NGIEI. 2020. № 11 (114). P. 65–78. (In Russ.). DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10106 .
10. Viktorovich, V.M., Vasilyevich, D.A., Vladimirovich, M.K. and Nikolaevich, S.V. Comprehensive Automation of Microprocessor Protection Relay Terminals Operated on AC Railways// Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. №10. – P/ 491-503. <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.102037>.
11. Ershov M.S., Nozdrya E.G. Adaptation of indicators and identification of violation of stability of industrial electrical systems / Industrial Power Engineering. 2018. - No. 12. - P. 2-5.
12. Menshov B.G., Ershov M.S., Egorov A.V. Determination of equivalent parameters of the power supply network for calculating the short-circuit current of the load node/Electricity. – 1993. - No. 10. – P. 19-22.
13. Ting Yang, Xiyang Qian and Liqing Ren. Application of Artificial Intelligence Algorithm in Relay Protection of Distribution Network// International Transactions on Electrical Energy Systems Volume 2022, Article ID 7138367, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2022/713836714>.
14. Zozan Saadallah Hussain, Ahmed J. Ali, Ahmed A. Allu, Rakan Khalil Antar. Improvement of protection relay with a single-phase auto reclosing mechanism based on artificial neural network// International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 505-514. ISSN: 2088-8694. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp505-514 .
15. Huo, C., Rong, X.-T., Huang, Z.-W., Han, Z.-X., Fan, Y.-P., Wang, Z.-J., & Fu, J.-R. (2025). A Novel Static Voltage Stability Region Boundary Generation Method Combining Analytics with Predictive Correction. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(5), 2977–2991. <https://doi.org/10.1007/s42835-025-02206-5>
16. Ahmad, H., Yousif, M., Shah, M., & Ullah, N. (2023). Monitoring Transient Stability in Electric Power Systems Using a Hybrid Model of Convolutional Neural Network and Random Forest. *Electric Power Components and Systems*, 52(6), 946–958. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2237034>
17. Umair Shahzad. Probabilistic Transient Stability Assessment of Power Systems Using Artificial Neural Network// Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEEECCS, 2021, Volume 8, Issue 27, pages 35-42.

Authors of the publication

Mikhail S. Ershov – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7772-0095>. ershov.ms@gubkin.ru

Semen M. Zhuravlev – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-2502-9414>. semen386z@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **07.08.2025 г.**

Отредактировано **01.10.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**