

УДК 621.311

DOI: 10.53297/18293328-2025.1-9

МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ СТАТОРА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

М.К. Багдасарян, Г.П. Варданян, Д.В. Давтян

Национальный политехнический университет Армении

Электрические неисправности, возникающие в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ), в основном проявляются рабочими характеристиками их обмоток. В данной работе предлагается новый подход к обнаружению и классификации фазных коротких замыканий в электромеханическом преобразователе энергии на основе искусственной нейронной сети. Получены характерные зависимости обмотки статора ЭМПЭ при однофазных, двухфазных и двухфазных коротких замыканиях на нейтрали. Получена и исследована динамика изменения фазных токов и напряжений для различных режимов работы. На основе полученных данных сформирована необходимая база данных для тестирования и обучения.

Разработана структурная схема алгоритма обнаружения и классификации фазных коротких замыканий ЭМПЭ. Она состоит из блоков оценки данных и обучения данных. Блок оценки данных собирает, оценивает и создает базу данных фазных токов и напряжений. Для выявления и классификации возникновения коротких замыканий использовались их пороговые значения. Обнаружение фазных коротких замыканий осуществляется с помощью искусственной нейронной сети, созданной в среде MATLAB. Полученные результаты были проверены на примере синхронного генератора.

Разработанная искусственная нейронная сеть имеет 4 слоя. Количество входных нейронов - 48. Они получены в результате обработки переменных $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ по различным критериям. Число, появляющееся в выходном нейроне, выявляет наличие или отсутствие короткого замыкания. Обоснованы высокая производительность и точность построенной нейронной сети.

Полученные результаты могут быть успешно использованы для разработки интеллектуальных систем мониторинга электромеханических преобразователей энергии.

Ключевые слова: нейронная сеть, электромеханический преобразователь энергии, короткое замыкание фазы, обработка данных.

Введение. Электрические неисправности в электромеханических преобразователях энергии возникают в результате износа деталей и старения материалов.

Повреждения ЭМПЭ по месту их возникновения и характеру происхождения делят на электрические и механические. К *электрическим* относят повреждения изоляции или токопроводящих частей обмоток, коллекторов, контактных колец и листов сердечников. *Механическими повреждениями* считают ослабление крепежных соединительных резьб, посадок, нарушения формы и поверхности деталей, перекосы и поломки. Повреждения обычно имеют очевидные признаки или легко устанавливаются измерениями [1-3].

Учитывая, что электрические неисправности являются наиболее распространенными в ЭМПЭ, в данной работе рассматривается выявление коротких замыканий, возникающих в обмотках.

Основные причины возникновения коротких замыканий между обмотками статора:

- *Перегрузка по току.* Если нагрузка двигателя превышает номинальную, то обмотка статора нагревается, изоляция местами разрушается, и между соседними обмотками происходит короткое замыкание.

- *Механические явления.* Вибрации, возникающие в ЭМПЭ, и неправильный монтаж могут повредить изоляцию обмоток.

- *Загрязнение обмоток.* Пыль, влага, масло снижают электрическую прочность изоляции.

- *Перенапряжение.* Импульсные перенапряжения могут пробить изоляцию.

Известны многочисленные работы по исследованию фазных коротких замыканий [4-7].

В [4] предложены индикаторы, основанные на величине пространственного вектора тока статора, для обнаружения и диагностики возникающих межвитковых коротких замыканий в асинхронных двигателях. Эффективность этих показателей оценивалась с использованием четырех методов машинного обучения, ранее описанных в литературе: случайные леса (RFs), машины опорных векторов (SVMs), k-ближайший сосед (kNN) и прямые и рекуррентные нейронные сети (FNN и RNN). Эта оценка проводилась с использованием экспериментальных данных.

В [5] представлены проектирование и разработка специализированной системы, способной обнаруживать короткие замыкания в витках обмотки двигателя, не прерывая рабочих условий двигателя. Данная система позволяет проводить локальные измерения для получения фазных токов. Эти данные формируют классифицированные дескрипторы с использованием многослойной нейронной сети персептрона. Разработанная нейронная сеть может клас-

сифицировать текущие неисправности с точностью 93,18%. Нейронная сеть была успешно реализована на недорогой и низкочастотной специализированной плате Field Programmable Gate Array для обработки в режиме онлайн.

В [6] представлена методика обнаружения межвитковых коротких замыканий в обмотках статора асинхронных двигателей с использованием аксиального магнитного потока в качестве диагностического параметра. Обнаружение неисправностей основано на анализе сигналов электродвижущей силы (ЭДС), индуцируемых осевым потоком в чувствительной катушке, получаемых с помощью быстрого преобразования Фурье. Эффективность этого метода подтверждена экспериментальными результатами.

В [7] предложен метод обнаружения межвитковых замыканий в обмотках статора на ранней стадии. Предлагаемый метод состоит из четырех шагов:

- предварительная обработка путем разложения сигнала на сигналы деталей и приближений с использованием вейвлет-преобразования;
- преобразование первого подробного сигнала в сигнал на основе частоты с использованием быстрого преобразования Фурье;
- вычисление значений статистических признаков для сигнала во временной и частотной областях;
- выявление неисправностей с использованием нейронной сети обратного распространения.

Комплексный анализ известных работ показывает, что накоплен значительный опыт в разработке методов и средств обнаружения и контроля фазных коротких замыканий в ЭМПЭ. Они могут быть успешно использованы для решения отдельных задач контроля и диагностики. Однако полученные результаты не позволяют с высокой точностью обеспечить определение места и вида однофазных и двухфазных коротких замыканий.

Учитывая особенности применения синхронных машин, своевременное обнаружение их неисправностей является актуальной проблемой, представляющей научный и технический интерес.

Целью работы является разработка модели обнаружения и классификации коротких замыканий на однофазных, двухфазных и нулевых проводах электромеханических преобразователей энергии на основе искусственной нейронной сети, позволяющей обеспечить высокую производительность и точность определения неисправностей.

Материалы и методы. Несимметрия распределения нагрузки между фазами электрической машины вызывает появление токов и напряжений обратной последовательности, которые приводят к возникновению переходных процессов [8]. Допустимая несимметрия нагрузки ограничена в связи с

тем, что она может привести к нарушению работы синхронной машины, работающей в генераторном или двигательном режиме. Несимметрия распределения нагрузки между фазами обусловлена в основном межфазными короткими замыканиями. Наиболее распространенными короткими замыканиями, нарушающими работу синхронной машины, считаются [9]:

- однофазное – возникает в фазах статора а, в, с;
- двухфазное – возникает между двумя фазами статора: ab, bc, ac;
- двухфазное короткое замыкание на нулевой провод – возникает между фазами и нейтралью: abg, bsg, asg.

В табл. 1-3 представлены характерные соотношения фазных токов и напряжений при коротких замыканиях.

Таблица 1

Характерные зависимости обмотки якоря синхронной машины при однофазных коротких замыканиях

Однофазные короткие замыкания	Фазные токи	Уравнения токов I_1, I_2, I_0	Фазные напряжения
В фазе а	$I_b = I_c = 0,$ $\dot{i}_a = I_a \frac{3\dot{E}}{j(x_d + x_2 + x_0)}$	$I_1 = I_2 = I_0 = I_a/3$	$U_a = 0,$ $U_b = E \left(a^2 - \frac{3(a^2 x_d + a x_2 + x_0)}{x_d + x_2 + x_0} \right),$ $U_c = E \left(a - \frac{3(a x_d + a^2 x_2 + x_0)}{x_d + x_2 + x_0} \right),$
В фазе в	$I_a = I_c = 0,$ $I_b = 3I_0,$ $\dot{i}_b = \frac{3\dot{E}}{j(x_d + x_2 + x_0)}$	$I_1 = I_2 = I_0 = I_b/3,$	$U_b = 0,$ $U_a = E \left(1 - \frac{3x_d}{x_d + x_2 + x_0} \right) (1 - a^2) - \frac{3Ex_d}{x_d + x_2 + x_0} (1 - a)$ $U_c = E \left(a - a^2 \left(1 - \frac{3Ex_d}{x_d + x_2 + x_0} + \frac{3Ex_2}{x_d + x_2 + x_0} \right) \right)$
В фазе с	$I_b = I_a = 0,$ $I_c = 3I_0,$ $\dot{i}_c = \frac{3\dot{E}}{j(x_d + x_2 + x_0)}$	$I_1 = I_2 = I_0 = I_c/3,$	$U_c = 0,$ $U_a = E \left(1 - \frac{3x_d}{x_d + x_2 + x_0} \right) (1 - a) - \frac{3Ex_d}{x_d + x_2 + x_0} (1 - a^2)$ $U_b = E \left(a^2 - a \left(1 - \frac{3Ex_d}{x_d + x_2 + x_0} + \frac{3Ex_2}{x_d + x_2 + x_0} \right) \right)$

Таблица 2

Характерные соотношения обмотки якоря синхронной машины при двухфазных коротких замыканиях

Двухфазные короткие замыкания	Фазные токи	Уравнения токов I_1, I_2, I_0	Фазные напряжения
Между фазами cb	$I_b = -I_c, I_a = 0,$ $\dot{i}_b = \frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$ $\dot{i}_c = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$	$I_1 = j I_b / \sqrt{3},$ $I_2 = -j I_b / \sqrt{3},$ $I_0 = 0,$	$U_b = U_c,$ $\dot{U}_a = \frac{2x_2 \dot{E}}{(x_d + x_2)},$ $U_b = U_c = -\frac{x_2 E}{x_d + x_2}$
Между фазами ba	$I_a = -I_b, I_c = 0$ $\dot{i}_a = \frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$ $\dot{i}_b = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$	$I_1 = j I_a / \sqrt{3},$ $I_2 = -j I_a / \sqrt{3},$ $I_0 = 0$	$U_b = U_a,$ $\dot{U}_c = \frac{2x_2 \dot{E}}{(x_d + x_2)}$ $U_b = U_a = -\frac{x_2 E}{x_d + x_2}$
Между фазами са	$I_c = -I_a, I_b = 0,$ $\dot{i}_c = \frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$ $\dot{i}_a = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}}{j(x_d + x_2)}$	$I_1 = j I_c / \sqrt{3},$ $I_2 = -j I_c / \sqrt{3},$ $I_0 = 0$	$U_a = U_c$ $\dot{U}_b = \frac{2x_2 \dot{E}}{(x_d + x_2)}$ $U_a = U_c = -\frac{x_2 E}{x_d + x_2}$

Таблица 3

Характерные соотношения обмотки якоря синхронной машины при двухфазных коротких замыканиях на нейтрали

Двухфазные короткие замыкания на нейтрали	Фазные токи	Фазные напряжения
1	2	3
Между фазами cb	$I_a = 0,$ $\dot{i}_b = \frac{j\sqrt{3} \left[j \frac{\sqrt{3}}{2} x_2 - \left(\frac{1}{2} x_2 + x_0 \right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E},$ $\dot{i}_c = \frac{j\sqrt{3} \left[j \frac{\sqrt{3}}{2} x_2 + \left(\frac{1}{2} x_2 + x_0 \right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E}$	$U_a = 3U_0, U_1 = U_2 = U_0 = U_a / 3$ $U_b = U_c = 0,$ $U_a = -\frac{3x_2 x_0 E}{x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d}$

Продолжение табл. 3

1	2	3
Между фазами ba	$I_c = 0,$ $\dot{i}_b = \frac{j\sqrt{3} \left[j\frac{\sqrt{3}}{2}x_2 - \left(\frac{1}{2}x_2 + x_0\right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E}$ $\dot{i}_a = \frac{j\sqrt{3} \left[j\frac{\sqrt{3}}{2}x_2 + \left(\frac{1}{2}x_2 + x_0\right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E}$	$U_c = 3U_0, U_1 = U_2 = U_0 = U_c/3,$ $U_b = U_a = 0$ $U_c = -\frac{3x_2 x_0 \dot{E}}{x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d}$
Между фазами ac	$U_a = U_c = 0, I_b = 0,$ $\dot{i}_a = \frac{j\sqrt{3} \left[j\frac{\sqrt{3}}{2}x_2 - \left(\frac{1}{2}x_2 + x_0\right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E};$ $\dot{i}_c = \frac{\sqrt{3} \left[j\frac{\sqrt{3}}{2}x_2 + \left(\frac{1}{2}x_2 + x_0\right) \right]}{(x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d)} \dot{E}$	$U_b = 3U_0, U_1 = U_2 = U_0 = U_b/3,$ $U_a = U_c = 0,$ $U_b = -\frac{3x_2 x_0 \dot{E}}{x_d x_2 + x_2 x_0 + x_0 x_d}$

В табл. 3 применяются следующие обозначения: E - ЭДС; I_o - ток нулевой последовательности; i_a, i_b, i_c - соответственно фазные токи фаз a, b, c; u_a, u_b, u_c - соответственно фазные напряжения фаз a, b, c; x_d - индуктивное сопротивление статора по продольной оси; x_o - индуктивное сопротивление нулевой последовательности; $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Используя соотношения, приведенные в табл. 1-3, можно получить временные изменения фазных токов и напряжений при всех возможных однофазных и двухфазных коротких замыканиях. На рис. 1-3 представлены некоторые примеры спектров фазных токов и напряжений.

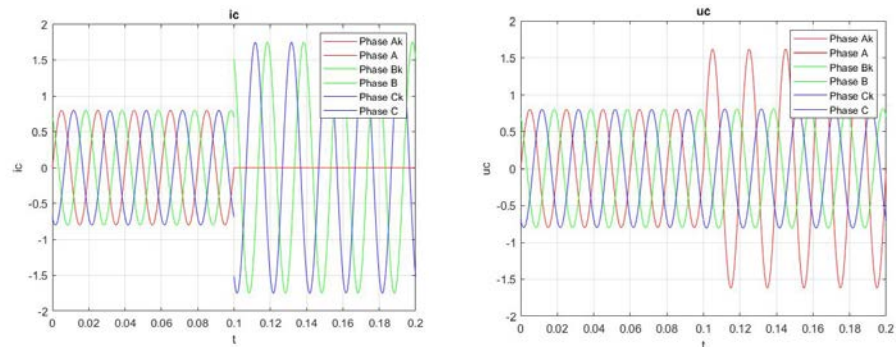


Рис. 1. Изображение фазных токов и напряжений при коротком замыкании в фазе c

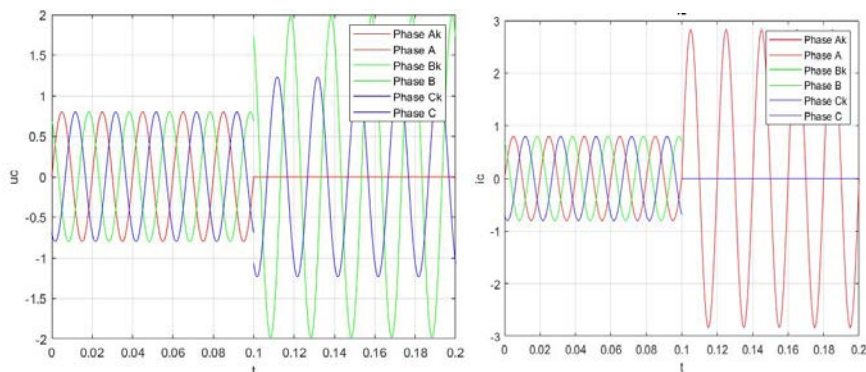


Рис. 2. Изображение фазных токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании в фазе *ac*

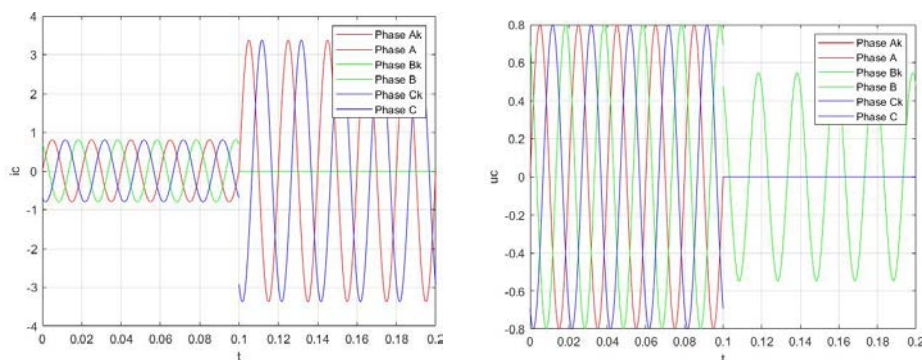


Рис. 3. Изображение фазных токов и напряжений при коротком замыкании в фазе *ac* переменного тока и на нулевом проводе

Результаты исследования. Данные собирались в диапазоне частот $f=45...55$ Гц в 200 случайных моментах времени в рабочем режиме с короткими замыканиями и без них [10,11]. Собранные 30000 данных обрабатывались с использованием различных критериев. На рис. 4 представлена структурная схема обнаружения коротких замыканий.

Обнаружение короткого замыкания фазы выполняется с помощью искусственной нейронной сети, созданной в среде MATLAB. Функция активации для скрытых слоев сети — гиперболический тангенс, а для выходного слоя — линейная функция.

Количество входных нейронов — 48, во втором и третьем слоях — 30 и 10 нейронов соответственно, а в выходном слое — 1. Входные нейроны получены путем обработки переменных $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ с 8 различными признаками. Число, появляющееся в выходном нейроне, выявляет наличие или отсутствие короткого замыкания.

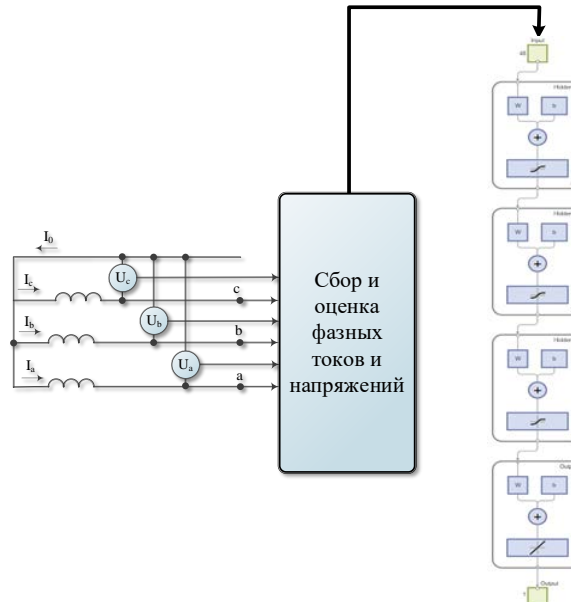


Рис. 4. Структурная схема обнаружения и классификации коротких замыканий

Эффективность построенной нейронной сети проверялась с помощью графика линейной регрессии (рис. 5), который сопоставляет фактические классы с предсказанными значениями. В данном случае коэффициент корреляции составил 0,998 (общая корреляция равна 1), что является достаточно хорошим результатом.

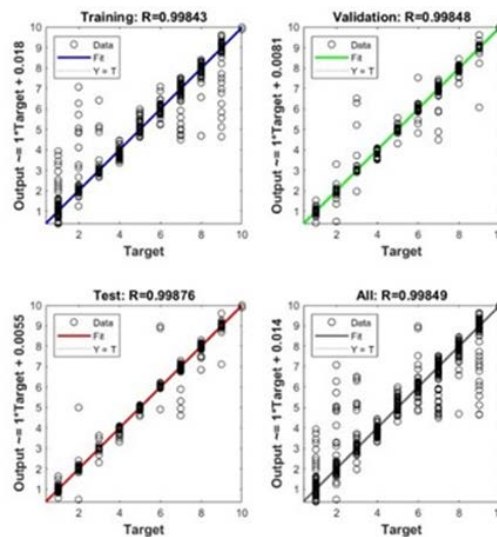


Рис. 5. Графики регрессии различных фаз обучения искусственной нейронной сети

Заключение. Обоснована необходимость создания модели для обнаружения и классификации коротких замыканий в обмотках электромеханического преобразователя энергии с высокой производительностью и точностью.

Сформирована база данных, содержащая 30000 точек данных, по характеристикам временных изменений фазных токов и напряжений при всех возможных однофазных, двухфазных и двухфазных коротких замыканиях с нулевым проводом трехфазной синхронной машины, а также в нормальном режиме работы. В результате обработки этих данных в среде MATLAB создана искусственная нейронная сеть, позволяющая с высокой точностью обнаруживать и классифицировать короткие замыкания в обмотках статора.

Литература

1. **Tian P., Guerrero J.M., Mahtani K., Platero C.A.** Instantaneous Specific Protection Method against Faulty Synchronizations of Synchronous Machines // IEEE Access.- 2021.- 9.- P. 88868 – 88878.
2. **Morais A., Bretas A., Brahma S., Cardoso G.** High-sensitivity stator fault protection for synchronous generators: A time-domain approach based on mathematical morphology // International Journal of Electrical Power and Energy Systems.- 2018.- 9.- P. 419-425.
3. **Baghdasaryan M., Ulikyan A., Khanamiryan Z., Arakelyan A.** Development of a Simulation Model for Detecting Phase Short Circuits of a Three-Phase Synchronous Machine Based on an Artificial Neural Network // Telematique.- 2023.- Vol. 22, no.1.- P. 1919-1929.
4. **Rengifo J., Moreira J., Vaca-Urbano F., Alvarez-Alvarado M.S.** Detection of Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors Using the Current Space Vector and Machine Learning Classifiers // Energies.- 2024.- 17.- 2241. <https://doi.org/10.3390/en17102241>
5. Detection of Short-Circuit Faults in Induction Motor Winding Turns Using a Neural Network and Its Implementation in FPGA / **L.C. García-Rodríguez, R. Santiago-Montero, J.J. RangelMagdaleno, F.J. Pérez-Pinal, et al** // Processes.- 2025.- 13.- 815. <https://doi.org/10.3390/pr13030815>.
6. **Kotelenets N.F., Assaf T. & Deeb M.** Inter-Turn Short Circuit Detection in a Stator Induction Motor Using an External Axial Flux Sensor // Power Technol Eng.- 2022.- 55.- P. 731–735.
7. Vibration-Signature-Based Inter-Turn Short Circuit Identification in a Three-Phase Induction Motor Using Multiple Hidden Layer Back Propagation Neural Networks /**D.R. Sawitri, M.A. Heryanto, H. Suprijono, et al** // International Review of Electrical Engineering.- 2018.- Vol. 13, N 2.- P. 98-106.
8. Experimental platform for controlled faults on synchronous generator armature windings /**R.M. Monaro, J.C.M. Vieira, D.V. Coury, et al** // IEEE Trans. Energy Convers.- 2012.- Vol. 27, N 4.- P. 948–957.

9. **Baghdasaryan M., Ulikyan A., Arakelyan A.** Application of an Artificial Neural Network for Detecting, Classifying, and Making Decisions about Asymmetric Short Circuits in a Synchronous Generator // *Energies*.- 2023.- Vol. 16, N 6.- P. 1-19.
10. **Li J., Cheng Ji., Shi Ji., Huang F.** Brief Introduction of Back Propagation (BP) Neural Network Algorithm and Its Improvement // *Advances in Computer Science and Information Engineering: Results of the 2012 2nd International Conference on Computer Science and Information Engineering (CSIE2012)*, May 19-20.- Zhengzhou, China, 2012.- P. 19-29.
11. **Koivo Heikki N.**, *Neural Networks: Basics using MATLAB Neural Network Toolbox*.- 2008.

*Поступила в редакцию 09.04.2025.
Принята к опубликованию 31.10.2025.*

**ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԵԽՆԱՆԻԿԱԿԱՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊՉԻ ՍՏԱՏՈՐԻ
ՓԱԹՈՒՅԹԻ ԳԱԼԱՐՆԵՐՈՒՄ ԱՌԱՋԱՅՈՂ ԿԱՐՃ ՄԻԱՑՈՒՄՆԵՐԻ
ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ՄՈՂԵԼ**

Մ.Ք. Բաղդասարյան, Գ.Պ. Վարդանյան, Դ.Վ. Դավթյան

Էներգիայի էլեկտրամեխանիկական փոխակերպիչներում առաջացող էլեկտրական անսարքությունները հիմնականում դրսևորվում են դրանց փաթույթների աշխատանքային բնութագրերով: Աշխատանքում առաջարկվում է էներգիայի էլեկտրամեխանիկական փոխակերպիչի (ԷԷՓ) ֆազային կարճ միացումների հայտնաբերման ու դասակարգման նոր մոտեցում՝ արհեստական նեյրոնային ցանցի (ԱՆՑ) հենքով: Ստացվել են միաֆազ, երկֆազ և չեզոքի վրա երկֆազ կարճ միացումների դեպքում ԷԷՓ-ի ստատորի փաթույթի բնութագրական առնչությունները: Տարբեր աշխատանքային ռեժիմների դեպքում ստացվել և ուսումնասիրվել է ֆազային հոսանքների և լարումների փոփոխման դինամիկան: Ստացված տվյալների հիման վրա ձևավորվել է թեստավորման և ուսուցման համար անհրաժեշտ տվյալների բազան:

Մշակվել է ԷԷՓ-ի ֆազային կարճ միացումների հայտնաբերման ու դասակարգման ալգորիթմի կառուցվածքային սխեման: Այն բաղկացած է տվյալների գնահատման և տվյալների ուսուցման բլոկներից: Տվյալների գնահատման բլոկում իրականացվում են ֆազային հոսանքների և լարումների հավաքագրում, գնահատում և տվյալների բազայի ստեղծում: Կարճ միացումների առաջացման փաստի բացահայտման և դասակարգման համար օգտագործվել են դրանց սահմանային արժեքները: Ֆազային կարճ միացումների հայտնաբերումն իրականացվում է MATLAB միջավայրում ստեղծված արհեստական նեյրոցանցի միջոցով: Ստացված արդյունքները փորձարկվել են սինքրոն գեներատորի օրինակով:

Մշակված արհեստական նեյրոնային ցանցն ունի 4 շերտ: Մուտքային նեյրոնների թիվը 48 է: Դրանք ստացվել են Ia, Ib, Ic, Ua, Ub, Uc փոփոխականների տարբեր չափանիշներով մշակման արդյունքում: Ելքային նեյրոնում հայտնված թիվը

բացահայտում է կարճ միացման բացակայությունը կամ առկայությունը: Հիմնավորվել են կառուցված նեյրոցանցի բարձր արտադրողականությունն ու ճշտությունը:

Ստացված արդյունքները հաջողությամբ կարող են օգտագործվել էներգիայի էլեկտրամեխանիկական փոխակերպիչների մոնիթորինգի խելացի համակարգերի մշակման համար:

Առանցքային բառեր. նեյրոնային ցանց, էներգիայի էլեկտրամեխանիկական փոխակերպիչ, ֆազային կարճ միացում, տվյալների մշակում:

A MODEL FOR DETECTING SHORT CIRCUITS IN STATOR WINDINGS OF AN ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER

M.K. Baghdasaryan, G.P. Vardanyan, D.V. Davtyan

Electrical faults occurring in electromechanical energy converters mainly manifest in the operating characteristics of their windings. In this paper, a new approach to detecting and classifying phase short circuits in an electromechanical energy converter (EMC) based on an artificial neural network (ANN) is proposed. Characteristic dependencies of the EMC stator winding for single-phase, two-phase and two-phase short circuits on the neutral are obtained. The dynamics of change in the phase currents and voltages for various operating modes are obtained and studied. Based on the obtained data, the necessary database for testing and training is formed.

A block diagram of the algorithm for detecting and classifying the phase short circuits of in EMCs is developed. It consists of data evaluation and data training blocks. The data evaluation block collects, evaluates and creates a database of phase currents and voltages. Threshold values of short circuits are used to detect and classify their occurrence. Phase short circuits are detected using an artificial neural network created in the MATLAB environment. The obtained results were tested on the example of a synchronous generator.

The developed artificial neural network has 4 layers. The number of input neurons is 48. They are obtained as a result of processing the variables I_a , I_b , I_c , U_a , U_b , U_c according to various criteria. The number appearing in the output neuron reveals the presence or absence of a short circuit. The high performance and accuracy of the constructed neural network are substantiated.

The results obtained can be successfully used to develop intelligent monitoring systems for electromechanical energy converters.

Keywords: neural network, electromechanical power converter, phase short circuit, data processing.

УДК 621.319.4

DOI: 10.53297/18293328-2025.1-20

ОЦЕНКА ТЕПЛОТДАЧИ В ИМПУЛЬСНЫХ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ЗМЕЕВИКОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Л.А. Варданян, С.С. Алавердян, Э.В. Кургинян, Г.В. Барегамян

Национальный политехнический университет Армении

Проведено комплексное исследование тепловых процессов и методов повышения тепловой устойчивости импульсных силовых конденсаторов змеевикового типа, широко применяемых в индукционных установках и силовой электронике. Одной из ключевых проблем эксплуатации таких устройств является перегрев, который существенно снижает их эксплуатационный ресурс, надежность и стабильность работы. В связи с этим особое внимание уделено разработке эффективных систем охлаждения, обеспечивающих своевременное и равномерное отведение тепла от активных элементов.

Основной задачей исследования стало определение оптимальных параметров водяного охлаждения, включая скорость потока охлаждающей жидкости, что позволило существенно снизить температуру силовых конденсаторов при их интенсивной импульсной нагрузке. Проведенный экспериментальный анализ теплового режима показал, что повышение скорости циркуляции жидкости улучшает теплообмен и способствует снижению перегрева, что подтверждается серией измерений и графическим представлением результатов.

В работе также рассмотрены основные принципы теплоотдачи, теплового баланса и механизмы передачи тепла в системе охлаждения, а также влияние оптимизации параметров на коэффициент теплоотдачи. Предложенные мероприятия позволили значительно повысить энергоэффективность установки, увеличить срок службы конденсаторов и повысить общую надежность силовых цепей.

Подчеркивается важность комплексного и системного подхода к вопросам теплоотвода в импульсных силовых системах. Представленные результаты создают основу для дальнейших исследований и разработки современных технологических решений в области охлаждения силовых компонентов, что актуально для широкого спектра задач, промышленных приложений, связанных с индукционными технологиями и высокоинтенсивными импульсными нагрузками.

Ключевые слова: теплоотдача, импульсный силовой конденсатор, водяное охлаждение, змеевик, тепловой режим.

Введение. Современные технологии обработки материалов и электротермические установки требуют использования мощных импульсных источников энергии. Одним из важнейших элементов таких систем являются силовые импульсные конденсаторы, которые накапливают энергию и быстро передают её на нагрузку. Применение этих конденсаторов особенно актуально в индукционных нагревательных установках, сварочных агрегатах, установках импульсного магнитного поля, в энергетике и авиационной технике.