

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ОПЕРАЦИИ ИХ НАМОТКИ

Г. В. Смирнов^а, Н. В. Замятин^б

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,

Российская Федерация

^а ✉ smirnov@main.tusur.ru, ^б zamnv47@gmail.com

Аннотация: провода с эмалевой изоляцией широко используются в различных электротехнических изделиях. Контроль эмалевой изоляции проводов крайне необходим в технологическом процессе их изготовления для повышения надежности. Существующие методы позволяют контролировать только дефекты, которые уже имеются до намотки. Поэтому описывается способ и устройство, позволяющие определять такие дефекты в процессе намотки, как их количество, так и размеры. Для принятия решения о дефекте применяется нейронная сеть с прямым распространением и подстройкой синаптических коэффициентов в ходе технологического процесса. Приведен пример реализации такого способа и устройства.

Ключевые слова: электропривод, эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, нейронная сеть, синапсы.

Для цитирования: Смирнов Г. В., Замятин Н. В. Нейронная сеть для контроля изоляции обмоток электротехнических изделий в процессе операции их намотки. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):13–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02.

Поступила в редакцию: 02.08.2024.

В окончательном варианте: 25.08.2024.

A NEURAL NETWORK FOR MONITORING INSULATION DURING COIL WINDING

G. V. Smirnov^a, N. V. Zamyatin^b

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

^a ✉ smirnov@main.tusur.ru, ^b zamnv47@gmail.com

Abstract: the use of enamel-insulated wires is widespread in various electrical products, making insulation control crucial during the manufacturing process to ensure reliability. Current methods can only detect defects in the insulation prior to the winding process. This study presents a method and device that enable the detection of insulation defects during the winding process, identifying both the number and size of defects in real-time. A feedforward neural network with synaptic coefficient adjustment is employed to make decisions about defect presence during manufacturing. An example implementation of this method and device is also provided.

Keywords: electric drive, enamel insulation, defect, defect sensor, neural network, synapses.

Cite this article: Smirnov G. V., Zamyatin N. V. A Neural Network for Monitoring Insulation During Coil Winding. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):13–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02.

Original article submitted: 02.08.2024.

Revision submitted: 25.08.2024.

Введение

Такие виды изделий, как электрические двигатели, трансформаторы, сельсины, реле, являются одними из самых распространенных видов продукции электротехнических изделий. Согласно статистике электроприводом оснащены примерно 85% всех двигательных и силовых механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, разнообразные технологические машины, бытовая техника и др.) [3–8]. Асинхронные двигатели (АД) стали изделием массового применения, и на сегодня они потребляют около 75 % вырабатываемой во всем мире электроэнергии [3].

Надежность этого вида изделий лимитируется состоянием их изоляции [2]. При этом самым ненадежным элементом этой изоляции является витковая изоляция, так как на ее долю приходится около 78% всех отказов электродвигателей [1, 2]. В свою очередь витковая изоляция — это эмалевая изоляция провода удвоенной толщины. При наличии в витковой изоляции дефектов, расстояние между

которыми меньше, чем это требуется для зажигания коронного или поверхностного разряда, может произойти пробой изоляции, который приведет к отказу электродвигателя.

Существующие методы контроля эмалированной изоляции проводов предназначены, как правило, для входного или выходного контроля состояния изоляции провода [3]. Разработанные способы и устройства контроля позволяют контролировать только те дефекты в изоляции провода, которые уже имеются на нем до процесса намотки обмоток. Эти дефекты с помощью разработанных способов и приборов могут быть обнаружены и в процессе намотки обмоток, когда провод движется с различными переменными скоростями [1, 2, 3].

Но для их реализации требуются датчики дефектов, наиболее распространенные из которых работают на принципе зажигания коронного разряда, возникающего между датчиком и жилой провода в месте дефекта. Основным недостатком таких устройств является необходимость датчика дефектов, на который подается высокое напряжение и имеется потребность заземления жилы провода. Однако преобладающее количество дефектов в изоляции проводов возникает именно в процессе намотки, что обусловлено большими усилиями при намотке на изоляцию провода, за счет которых происходит удлинение провода и растрескивание изоляции [4–10]. При соприкосновении с элементами намоточного станка происходит разрушение эмалированной изоляции и в ней образуются дефекты в виде сдиров, трещин и царапин. Именно эти, технологические дефекты, возникающие при намотке обмоток, и являются основной причиной отказа обмоток электродвигателей.

Были попытки решения проблемы выявления технологических дефектов в работах [11, 12], однако в этих решениях можно было зарегистрировать только наличие дефектов в изоляции провода, но нельзя было определить их размеры, в частности, протяженность. А этот показатель не менее важен при оценке качества изоляции обмоток. В частности, такие дефекты, как точечный прокол изоляции, могут и не привести к отказу обмотки. А если же дефект, например, сдир изоляции в определенных местах, имеет определенную протяженность, то риск замыкания в обмотке или пробоем изоляции в месте таких протяженных дефектов во много раз возрастает. Чем протяженнее дефект, тем выше вероятность пробоя или замыкания в обмотке. Кроме того, все упомянутые способы — измерители дефектов требуют подсоединения жилы провода к источнику тока или ее заземления, что значительно усложняет их применение. В статье приводится один из вариантов контроля дефектности в изоляции обмоток, который позволяет определить не только количество повреждений в упомянутой изоляции, но и их размеры (протяженность). Кроме того, предлагаемый способ позволяет осуществить гальваническую развязку между жилой провода и датчиками дефектов. В рассматриваемом примере в качестве датчиков дефектов предлагается использовать элементы намоточного оборудования, а гальваническая развязка обеспечивается генератором наводки, создающим в жиле провода наведенную ЭДС.

Структурная схема измерителя дефектности и принцип его работы

На рис. 1 приведена структурная схема предлагаемого устройства.

На рис. 2 приведены эпюры сигналов, служащие для пояснения сущности технического решения.

На рис. 3 приведена нейронная сеть для распознавания дефектов и управления.

Сущность предлагаемого устройства заключается в следующем. При намотке обмоток в изоляции провода могут иметь место два вида дефектов: входные и технологические дефекты. Под входными дефектами понимают те дефекты, которые уже имеются в изоляции провода при его поставке. Под технологическими дефектами понимается повреждение изоляции провода элементами 4, 5, 6, 7, 8 (рис. 1) намоточного оборудования до жилы провода. В реальном намоточном станке элементы 4, 5, 6, 7, 8 представляют собой дискообразные ролики, через которые проходит провод 1 при намотке его на шаблон 3. Расстояние L_i между каждым из упомянутых элементов определяют и вносят в память нейронной сети 17. Измерение и внесение упомянутых L_i расстояний между элементами намоточного станка в нейронную сеть необходимо для правильного определения количества и протяженности дефектов в изоляции провода и исключения ошибок в процессе контроля.

Ошибки в процессе контроля могут быть обусловлены тем, что один и тот же дефект может быть посчитан столько раз, сколько раз жила провода в дефектном месте изоляции соприкоснется с различными элементами намоточного станка. Чтобы этого не происходило, в нейронной сети рассматривают различные варианты возможного ложного счета и разрабатывают алгоритмы их исключения. Предположим, в изоляции провода имеется в состоянии поставки или образовался в процессе намотки

некоторый дефект, и он проходит через элемент 4 намоточного станка, являющийся роликом смотчика (рис. 1).

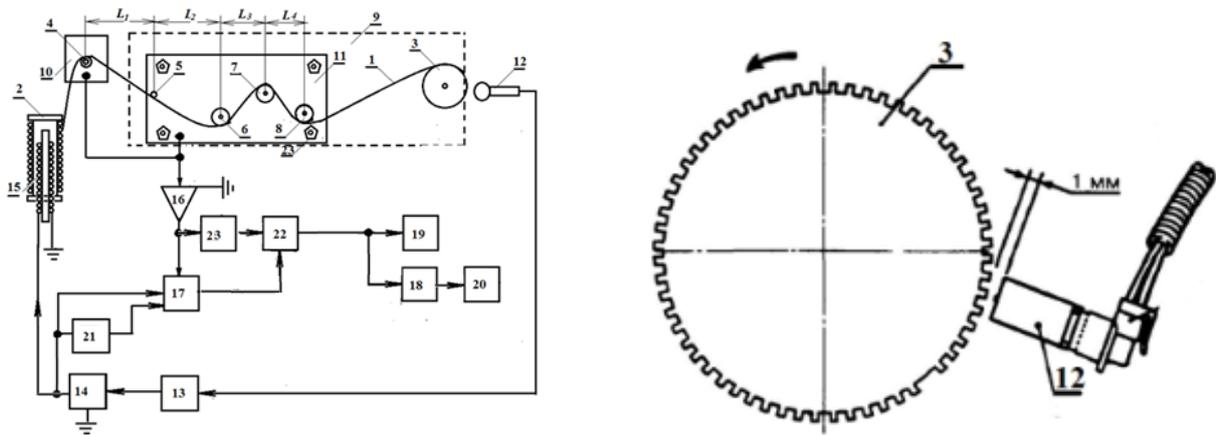


Рис. 1. Структурная схема измерителя дефектов

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – провод; 2 – катушка; 3 – шаблон; 4 – ролик смотчика; 5, 6, 7, 8 – ролики намоточного станка; 9 – корпус станка; 10 – платформа ролика смотчика; 11 – платформа роликов станка; 12 – датчик скорости; 13 – формирователь импульсов скорости; 14 – генератор импульсов наводки; 15 – излучатель; 16 – высокоомный усилитель; 17 – компьютер с нейронной сетью; 18 – низкочастотный фильтр; 19 – счетчик протяженности входных дефектов; 20 – счетчик количества дефектов; 21 – счетчик длины провода; 22 – ключевое устройство; 23 – линия задержки.

Жила провода в месте этого дефекта при дальнейшем движении провода при намотке может соприкоснуться только с роликами 5, 6, 7 и 8, которые являются элементами намоточного оборудования, дойдет до последующих роликов и может вызвать с этими элементами замыкание жилы провода. Путь S_i до ролика 5 равен расстоянию L_i , т. е. $S_i = L_i$. Путь S_2 до ролика 6 равен $S_2 = L_1 + L_2$; путь S_3 до ролика 7 равен $S_3 = L_1 + L_2 + L_3$; путь S_4 до ролика 8 равен $S_4 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$.

Если дефект вызвал контакт жилы провода на ролике 5, то он может при движении в процессе намотки вызвать замыкания на роликах 6, 7 и 8, пройдя соответствующие пути $S_3 = L_2$; $S_6 = L_2 + L_3$ и $S_7 = L_2 + L_3 + L_4$.

Если дефект возник или проявил себя на ролике 6, то он в дальнейшем может вызвать замыкания на роликах 7 и 8, пройдя соответствующие пути $S_8 = L_3$; $S_9 = L_3 + L_4$. Если дефект образовался и проявил себя замыканием жилы провода на ролике 7, то он может вызвать замыкания только на ролике 8, пройдя соответствующий путь $S_{10} = L_4$.

Рассмотренные варианты возможных расстояний, проходимых дефектным участком в изоляции провода, от элемента, в котором он проявился замыканием, до последующих элементов, в которых он может вызвать повторное замыкание и ложный счет дефектов, вносят в нейронную сеть в процессе ее обучения.

При движении провода 1 в процессе намотки обмоток датчик 12 скорости (рис. 1) вырабатывает импульсы скорости, частота которых пропорциональна скорости V движения провода. Эти импульсы поступают на вход формирователя 13 импульсов скорости, который по существу является множителем частоты. В формирователе 13 импульсов скорости происходит формирование их по напряжению и крутизне фронтов. Сформированные импульсы скорости поступают на вход генератора импульсов наводки 14 и с его выхода – на вход катушки излучателя 15. Излучатель 15 излучает эти импульсы и индуцирует соответствующую наводку в виде серии этих импульсов в катушке 2 обмоточного провода.

Одновременно с этим сгенерированные импульсы скорости в генераторе наводки 14 поступают в счетчик 21 длины проконтролированного провода.

Работу измерителя дефектов поясняют эпюры, приведенные на рис. 2.

На счетный вход счетчика 21 длины проконтролированного провода непрерывно поступают импульсы скорости с генератора 14 наводки, с периодом следования, равным прохождению под датчи-

ком скорости фиксированной определенной длины l_3 провода, например $l_3 = 0,025$ мм (рис. 2, эюры А и Б).

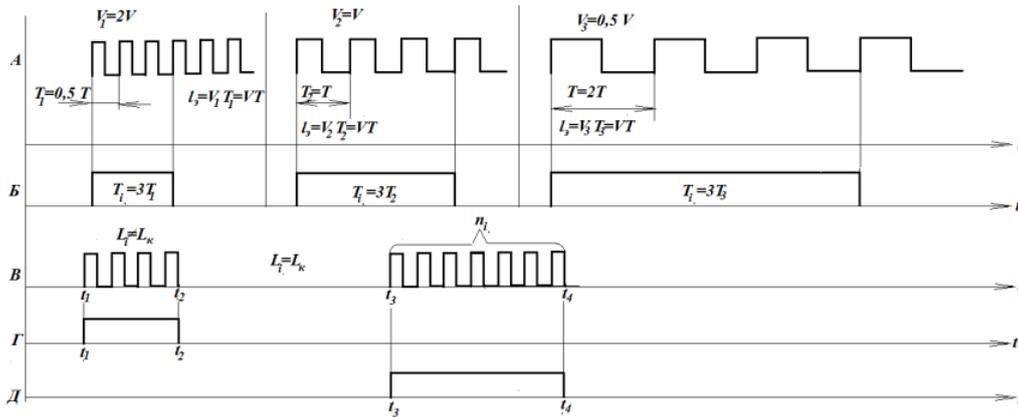


Рис. 2. Эюры сигналов

Так как длительность одного импульса скорости соответствует прохождению через датчик дефектов строго фиксированной элементарной длины провода l_3 , величина которой остается неизменной при изменении скорости, то проконтролированная длина провода определяется величиной $l_{пр} = l_3 \times m_{пр}$, где $m_{пр}$ — количество импульсов скорости, прошедших в счетчик 22 за время контроля.

Обозначим период следования импульсов скорости с формирователя (умножителя частоты 13) импульсов скорости через T_1 . При скорости движения провода V_1 на выходе формирователя 13 появляются импульсы частотой $f_1 = \frac{1}{T_1}$. При этом за время одного периода сигнальных импульсов провод пройдет расстояние l_3 , принятое за единицу измерения протяженности дефекта, равное по величине протяженности эквивалентного точечного повреждения (рис. 2, эюры А и Б):

$$l_3 = V_1 \times T_1. \quad (1)$$

При измерении скоростей протягивания провода в g раз пропорционально ей в g раз изменяется и частота импульсов эквивалентных точечных повреждений, что приводит к неизменности величины, определяемой по выражению (1).

Действительно, частота импульсов скорости изменяется пропорционально скорости провода $V_{пр}$. K_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции датчика скорости.

За время одного периода индуцированного в датчике скорости напряжения через датчик-электрод проходит участок провода длиной l_3 , равный

$$l_3 = V_{пр} \times T_3 \cong \frac{V_{пр}}{f} = \frac{V_{пр}}{K_1 V_{пр}} = \frac{1}{K_1}, \quad (2)$$

где $T_3 = \frac{1}{f}$ — период импульсов в датчике скорости.

Как следует из выражения (2), величина l_3 не зависит от скорости движения провода. Приняв l_3 за единицу измерения, можно определить, какая длина провода $l_{пр}$ прошла через датчик длины провода за любой интервал времени, если посчитать количество импульсов скорости n в счетчике (рис. 1) за время контроля $T_{кон}$ указанного отрезка провода:

$$l_{пр} = n \times l_3, \quad (3)$$

где $l_{пр}$ — длина отрезка провода, прошедшего в счетчик 22 длины проконтролированного провода; n — количество импульсов скорости за время $T_{пр}$ движения провода при контроле.

Генератор 14 импульсов наводки подает эти импульсы на вход излучателя 15, который индуцирует импульсы ЭДС в катушке 2 обмоточного провода.

При прохождении участков обмоточного провода с бездефектной изоляцией через элементы 4, 5, 6, 7, 8, если элементы намоточного станка не повреждают изоляцию, никаких изменений, кроме подсчета количества импульсов скорости в счетчике 22 длины проконтролированного провода, в сигналах устройства не происходит.

Пусть в некоторый момент времени t_1 жила провода в дефектном месте изоляции соприкоснулась с одним из элементов 4, 5, 6, 7, 8. Допустим, контакт соответствующего элемента с жилой провода продолжался до некоторого момента времени t_2 . Так как все указанные элементы электрически изолированы от заземленного корпуса намоточного станка, то на элементе, с которым произошел контакт жилы провода, появляются импульсы наведенной в проводе ЭДС (рис. 2, эпюра В). Эти импульсы поступают на вход высокоомного усилителя 16 (рис. 1), усиливаются и с выхода упомянутого усилителя поступают на вход нейронной сети 17. Если это был первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка, то нейронная сеть никаких сигналов не вырабатывает, и импульсы скорости, задержанные в линии задержки 23 на время опроса и принятия решения нейронной сетью 17, проходят через ключевое устройство 22 на вход счетчика 19 протяженности дефектов и на вход формирователя 18 импульса дефекта. В формирователе 18 вырабатывается импульс дефекта, длительность которого T_i равняется $T_i = t_2 - t_1$ (рис. 2, эпюра Г) времени контакта жилы провода в месте дефекта с одним из элементов намоточного станка. Этот импульс поступает на вход счетчика 20 количества дефектов и подсчитывается. По количеству подсчитанных импульсов скорости, прошедших в счетчик 19 протяженности, определяется протяженность дефекта.

Если же это был не первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного провода, например, в момент времени t_3 , а первый контакт с каким-то элементом намоточного оборудования произошел во время t_1 , то счетчик 21 подсчитывает число N импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$, рассчитывает величину L_k пути, которую прошел провод за этот интервал времени, и передает это значение в нейронную сеть 17. Величину L_k нейронная сеть сравнивает с каждым из возможных вариантов расстояний S_i между элементами намоточного оборудования, по прохождению которых обнаруженный ранее дефект может вызвать повторное замыкание в последующих элементах устройства. Равенство $L_k = S_i$ соответствует одному из вариантов указанных расстояний, рассчитанных и внесенных в память значений входов для нейронной сети. Это означает, что дефект, проявивший себя в момент времени t_3 , ранее уже был зарегистрирован счетчиками 20 и 19 количества и протяженности дефектов, когда он в момент времени t_1 проходил через какой-то из элементов намоточного оборудования. Поэтому для исключения возможной ошибки, возникающей при прохождении одного и того же дефекта через различные элементы намоточного оборудования, повторные замыкания жилы провода на эти элементы, т.е. ложные подсчеты количества и протяженностей дефектов, при повторных контактах ранее зарегистрированного дефекта с последующими элементами намоточного оборудования необходимо исключить. Это исключение происходит следующим образом. При выполнении равенства $L_k = S_i$ нейронная сеть выдает запрещающий сигнал, длительность $T_{\text{зап}}$ которого определяется временем контакта $t_4 - t_3$ (рис. 2, эпюра Д) и обычно на некоторую величину Δ превышает указанное время, т.е. $T_{\text{зап}} = (t_4 - t_3) + \Delta$. Величина Δ обычно определяется из прагматических соображений экспериментально. Сформированный импульс запрета поступает на ключевое устройство 22 и запрещает на время $T_{\text{зап}}$ прохождение задержанного линией 23 сигнала от высокоомного усилителя 16 к счетчикам 20 и 19 количества и протяженности дефектов. Указанные счетчики отключаются на время $T_{\text{зап}}$, а указанный дефект и его протяженность в этих счетчиках не подсчитываются. По истечении времени $T_{\text{зап}}$ ключевое устройство возвращается в исходное состояние, разрешающее прохождение сигнала к счетчикам 19 и 20 с выхода высокоомного усилителя 16.

Если L_k не равняется ни одному из упомянутых выше значений S_i рассчитанных вариантов, то нейронная цепь не вырабатывает запрещающего сигнала, и ключевое устройство пропускает задержанные в линии задержки усиленные импульсы ЭДС на вход счетчиков 19 и 20.

Алгоритм работы компьютера с нейронной сетью

Вариантов работы нейронной сети при реализации описываемого устройства может быть множество. Рассмотрим один из них.

Пусть в некоторый момент времени, обозначим его t_1 , произошло касание жилы провода дефектного участка изоляции с любым из элементов намоточного станка 4, 5, 6, 7 или 8 (рис. 1). Пусть контакт соответствующего элемента с жилой провода продолжался до некоторого момента времени t_2 . Так как все указанные элементы электрически изолированы от заземленного корпуса намоточного станка, то на элементе, с которым произошел контакт жилы провода, появляются импульсы наведенной в проводе ЭДС (рис. 2, эпюра В). Эти импульсы поступают на вход высокоомного усилителя 16 (рис. 1), усиливаются и с выхода упомянутого усилителя поступают на вход нейронной сети 17. Если

это был первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка, то нейронная сеть никаких сигналов не вырабатывает, и импульсы скорости, задержанные в линии задержки 23 на время опроса и принятия решения нейронной сетью 17, проходят через ключевое устройство 22 на вход счетчика 20 протяженности дефектов и на вход формирователя 18 импульса дефекта. В формирователе 18 вырабатывается импульс дефекта, длительность которого T_i равняется $T_i = t_2 - t_1$ (рис. 2, эпюра Г) времени контакта жилы провода в месте дефекта с одним из элементов намоточного станка. Этот импульс поступает на вход счетчика 20 количества дефектов и подсчитывается. По количеству подсчитанных импульсов скорости, прошедших в счетчик 19 протяженности, определяется протяженность дефекта.

Пусть второй контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка произошел в момент времени t_3 . Количество импульсов скорости от момента t_1 первого касания жилы провода с любым элементом намоточного оборудования до момента второго касания жилой провода любого другого элемента намоточного станка в момент времени касания t_3 , будет равно $n_{1,3}$. Число $n_{1,3}$ импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$ определяет длину пути $l_{1,3}$, которую прошел провод за интервал времени $t_3 - t_1$.

Так как за один импульс скорости провод проходит элементарное расстояние l_3 , то расстояние $l_{1,3}$ нейронная сеть определит по формуле:

$$l_{1,3} = n_{1,3} \times l_3. \quad (4)$$

Поскольку на вход нейронной сети предварительно введены пути $S_i (i = 1, 2, \dots, 10)$, то нейронная сеть сравнивает вычисленный путь $l_{1,3}$ с каждым из путей S_i в сумматоре. Для этого нейронная сеть рассчитывает разницу между расстоянием, определенным по формуле (4), и каждым из путей S_i , введенных в ее память, по абсолютной величине по формуле:

$$\Delta_i = |l_{1,3} - S_i|. \quad (5)$$

Каждую из найденных величин Δ_i (их в нашем случае будет 10) нейронная сеть сравнивает с выбранной допустимой ошибкой Δ_p определения расстояния, например, равной $2l_M$.

Выполнение неравенства

$$\Delta_i \leq \Delta_p \quad (6)$$

хотя бы для одного из 10 выражений свидетельствует о том, что данный дефект уже был зарегистрирован счетчиками 19 и 20 при его предыдущем контакте в момент времени t_1 с одним из элементов оборудования. Контакт в момент времени t_3 с последующим элементом намоточного оборудования вызван тем же дефектом, который уже был зарегистрирован счетчиками 20 и 19 в момент t_1 , и его нужно исключить из последующего счета. Это исключение происходит следующим образом. При выполнении неравенства (6) нейронная сеть выдает запрещающий сигнал, длительность $T_{\text{зап}}$ которого определяется временем контакта $t_4 - t_3$ (рис. 2, эпюра Д) и обычно на некоторую величину Δ превышает указанное время, т.е. $T_{\text{зап}} = (t_4 - t_3) + \Delta$.

Величина Δ обычно определяется из прагматических соображений экспериментально. Сформированный импульс запрета поступает на ключевое устройство 22 и запрещает на время $T_{\text{зап}}$ прохождение задержанного линией 23 сигнала от высокоомного усилителя 16 к счетчикам 20 и 19 количества и протяженности дефектов. Указанные счетчики отключаются на время $T_{\text{зап}}$, и указанный дефект и его протяженность в этих счетчиках не подсчитываются. По истечении времени $T_{\text{зап}}$ ключевое устройство возвращается в исходное состояние, разрешающее прохождение сигнала к счетчикам 19 и 20 с выхода высокоомного усилителя 16.

Если же выполняется неравенство

$$\Delta_i \geq \Delta_p \quad (7)$$

для всех 10 выражений, то это свидетельствует о том, что дефект, вызвавший замыкание с одним из последующих элементов станка, ранее не был зарегистрирован и его нужно зафиксировать счетчиками 20 и 19. Для регистрации упомянутого дефекта при выполнении (7) для всех 10 выражений нейронная сеть не вырабатывает никаких запрещающих команд, и ключевое устройство пропускает данный сигнал к счетчикам 19 и 20, где он и регистрируется.

После выполнения операции подсчета количества импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$ и выражений (5) и (6), независимо от того, какое неравенство, (5) или (6), было выполнено,

с момента времени t_3 счетчик вновь начинает подсчитывать импульсы скорости. Этот подсчет происходит до момента t_5 следующего касания жилы провода в дефектном участке изоляции с одним из элементов намоточного оборудования. После выявления этого контакта определяется количество импульсов скорости $n_{3,5}$ и определяется длина участка провода, прошедшего за интервал времени $t_5 - t_3$ по формуле $l_{3,5} = n_{3,5} \times l_3$. Затем по формуле $\Delta_i = |l_{1,3} - S_i|$ определяется величина Δ_i , сравнивается с ошибкой Δ_p , и вся описанная выше процедура повторяется вновь.

Резюмируя вышесказанное, в общем виде можно представить алгоритм работы нейронной сети следующим образом:

1. Для нейронной сети счетчик подсчитывает количество импульсов $n_{j,j+1}$ скорости между двумя последующими замыканиями жилы провода с одним из элементов намоточного оборудования, происшедшими в моменты времени t_j и t_{j+1} соответственно.
2. Определяет отрезок пути $l_{j,j+1}$, который прошел провод за время $t_{j+1} - t_j$ по формуле $l_{j,j+1} = n_{j,j+1} \times l_3$.
3. Рассчитывает разницу между расстоянием, определенным по формуле, представленной в пункте 2, и каждым из путей S_i , введенных в ее память, по абсолютной величине по формуле: $\Delta_i = |l_{j,j+1} - S_i|$, где S_i – возможные расстояния между элементами намоточного станка (в рассматриваемой заявке $i=1,2,\dots,10$).
4. Каждую из найденных величин Δ_i (их в нашем случае будет 10) нейронная сеть сравнивает с выбранной допустимой ошибкой Δ_p определения расстояния, например Δ_p , равной $2l_3$.
5. При выполнении хотя бы в одном из 10 случаев неравенства $\Delta_i \leq \Delta_p$ нейронная сеть принимает решение об исключении подсчета дефекта, выявленного в момент времени t_{j+1} , так как этот дефект уже был зарегистрирован в момент времени t_j .
6. При выполнении во всех 10 случаях неравенства $\Delta_i \geq \Delta_p$ нейронная сеть принимает решение о необходимости подсчета дефекта, выявленного в момент времени t_{j+1} , так как этот дефект не был зарегистрирован ранее.

Нейронная сеть для распознавания и управления

Нейронная сеть предназначена для распознавания уникальности дефекта и выработки управляющего воздействия на ключевой элемент. Нейронная сеть имеет три слоя и функционирует в режиме сети прямого распространения и в режиме компаратора (рис. 3).

Первый слой является входным и имеет два входа: $n_{j,j+1}$ вход – значение количества импульсов и вход S_i – возможные расстояния между элементами намоточного станка (всего их 10).

Второй слой имеет 10 нейронов и состоит из синаптических коэффициентов и сумматора, в котором реализуется разность $l_{1,3} - S_i$.

Синаптических коэффициентов два на каждом нейроне: $w1$ – элементарное расстояние l_3 для входа $n_{j,j+1}$ и $w2$ равно -1 .

Вход $S1,3$ умножается на l_3 , а вход S_i умножается на -1 . В сумматоре реализуется разность $l_{1,3} - S_i$.

Активационная функция представляет ступеньку с порогом в виде допустимой ошибки Δ_{pb} , и при этом реализуется условие $\Delta_i \leq \Delta$. Если $\Delta_i \leq \Delta$, то на выходе нейрона формируется 0, в противном случае 1.

Третий слой нейронной сети состоит из одного нейрона, функционирующего в режиме компаратора. Синаптические коэффициенты у всех входов равны 1, активационная функция в виде инверсного порога от 1 до 0. Если на входе все 0, то на выходе 1, значит, на ключевой элемент поступает 1 и дефект распознается как уникальный и фиксируется, в противном случае дефект является уже зафиксированным.

Пример реализации рассматриваемого способа контроля дефектности

Был проведен контроль с применением заявляемого устройства дефектности обмоточных проводов, блок-схема которого приведена на рис. 1. При намотке обмоточный провод проходил через ролик смотчика 4 и ролики 5, 6, 7, 8, являющиеся элементами намоточного станка. Указанные ролики изолировались от заземленного корпуса намоточного станка 9. Для этого они закреплялись на металлических платформах 10 и 11, и эти платформы через электроизоляционные прокладки из тефлона прикреплялись к корпусу станка 9 диэлектрическими стяжками 23, выполненными из капролактама.

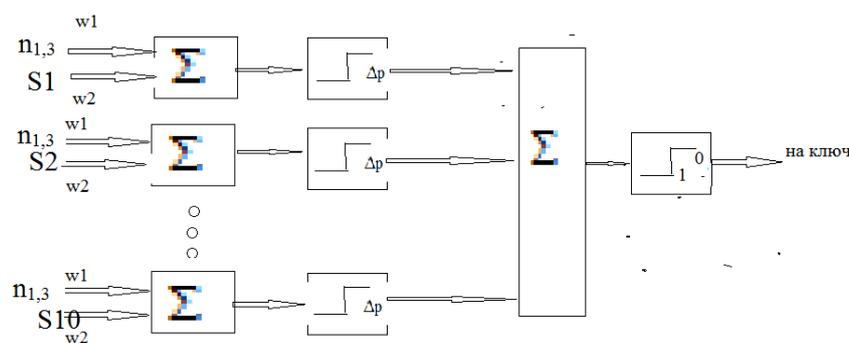


Рис. 3. Нейронная сеть для распознавания дефектов и управления

В качестве датчика скорости использовался индукционный датчик 12. Датчик скорости 12 и вращающийся диск 3, на котором закреплялся шаблон изготавливаемой всыпной обмотки статора электродвигателя, показаны внизу рис. 1 для пояснения работы индукционного датчика скорости 12. При намотке обмоток на шаблон, стальной диск 3, на котором этот шаблон располагается, начинает вращаться. При прохождении зубчатой части диска 3 возле катушки датчика скорости 12 за счет изменения величины магнитного потока индуцируются электрические импульсы, частота которых определяется размерами и количеством зубьев на диске 3 и скоростью вращения этого диска. При равномерной скорости вращения диска частота наведенных импульсов остается постоянной. При изменении скорости вращения диска изменяется и частота упомянутых импульсов пропорционально изменению скорости вращения диска. Полученные на выходе датчика 12 импульсы поступают на вход формирователя импульсов 13 скорости, представляющий собой умножитель частоты. Введение умножителя частоты позволяет повысить точность при определении протяженности дефектов. Сформированные импульсы скорости поступают на генератор наводки 14, и с его выхода проходят на катушку 15 излучателя. Электромагнитные импульсы излучателя 15 наводят в катушке провода 2 импульсную ЭДС, частота импульсов которой пропорциональна скорости. За время одного наведенного в катушке 2 импульса скорости проходит элементарный путь l_3 . За счет введения в устройство умножителя частоты удалось обеспечить величину $l_3 = 0,25$ мм.

Перед контролем измерялись расстояния между роликами смотчика и намоточного станка 4, 5, 6, 7, 8. Они были равны соответственно $L_1 = 620$ мм, $L_2 = 500$ мм, $L_3 = 400$ мм и $L_4 = 400$ мм.

По измеренным расстояниям L_i определялись варианты S_i возможных расстояний, которые может пройти дефектный участок после его обнаружения, за счет возникновения контакта жилы провода в этом участке с каким-то из элементов намоточного оборудования. Эти S_i приведены ниже:

$$S_1 = L_1 = 620 \text{ мм};$$

$$S_2 = L_1 + L_2 = 620 + 500 = 1120 \text{ мм};$$

$$S_3 = L_1 + L_2 + L_3 = 620 + 500 + 400 = 1520 \text{ мм};$$

$$S_4 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 620 + 500 + 400 + 400 = 1920 \text{ мм}.$$

Все величины L_i и S_i были внесены в нейронную сеть 17. Для проверки работоспособности заявляемого способа в изоляции провода искусственно были нанесены два дефекта, границы которых находились на расстоянии 300 мм, с протяженностями $l_1 = 5$ мм и $l_2 = 10$ мм. Вначале отрезок провода с нанесенными на него искусственными дефектами протягивался через все элементы намоточного оборудования при отключенной нейронной сети. При этом оба дефекта вызвали замыкание со всеми элементами намоточного оборудования, и без обученной нейронной сети счетчик количества дефектов показал 10, что говорило о том, что оба дефекта вызвали замыкание жилы провода на соответствующие элементы 4, 5, 6, 7, 8 элементов станка по одному разу.

После этого нейронную цепь подключали и протягивали со скоростью $V \approx 50$ мм/с упомянутый отрезок провода с нанесенными в его изоляции двумя дефектами через те же элементы намоточного станка, но при использовании схемы, приведенной на рис. 1, реализующей заявляемый способ.

Рассмотрим, как происходила регистрация количества и протяженности дефектов.

Таблица

Анализ вариантов замыканий жилы провода на элементы станка

№ контак- та, j	Время кон- такта, с	Продолжи- тельность контакта, с	Расстояние L_{jk} , пройденное проводом от момента контак- та j к моменту контакта k, мм	Вывод нейрон- ной сети	Запрещающий сигнал нейронной сети (да, нет)
1	12,5	0,1	$L_{0,1} = 0$	$L_{0,1} \neq S_i$	нет
2	18,5	0,2	$L_{1,2} = 300$	$L_{1,2} \neq S_i$	нет
3	24,9	0,1	$L_{2,3} = 320$ $L_{1,3} = 620$	$L_{1,3} = S_i$ $L_{2,3} \neq S_i$	да
4	30,9	0,2	$L_{3,4} = 320$ $L_{2,4} = 620$ $L_{1,4} = 920$	$L_{3,4} \neq S_i$ $L_{2,4} = S_i$ $L_{1,4} \neq S_i$	да
5	34,9	0,1	$L_{4,5} = 320$ $L_{3,5} = 620$ $L_{2,5} = 920$ $L_{1,5} = 1120$	$L_{3,4} \neq S_i$ $L_{2,4} = S_i$ $L_{1,4} \neq S_i$ $L_{1,5} \neq S_i$	да
6	40,9	0,2	$L_{5,6} = 320$ $L_{4,6} = 620$ $L_{3,6} = 920$ $L_{2,6} = 1120$ $L_{1,6} = 1420$	$L_{5,6} \neq S_i$ $L_{4,6} = S_i$ $L_{3,6} \neq S_i$ $L_{2,6} = S_i$ $L_{1,6} \neq S_i$	да
7	42,9	0,1	$L_{6,7} = 320$ $L_{4,6} = 620$ $L_{3,6} = 920$ $L_{2,6} = 1120$ $L_{1,6} = 1420$ $L_{1,7} = 1520$	$L_{6,7} \neq S_i$ $L_{4,6} = S_i$ $L_{3,6} \neq S_i$ $L_{2,6} = S_i$ $L_{1,6} \neq S_i$ $L_{1,7} \neq S_i$	да
8	48,9	0,2	$L_{7,8} = 320$ $L_{6,8} = 620$ $L_{5,8} = 920$ $L_{4,8} = 1120$ $L_{3,8} = 1420$ $L_{2,8} = 1520$ $L_{1,9} = 1820$	$L_{7,8} \neq S_i$ $L_{6,8} = S_i$ $L_{5,8} \neq S_i$ $L_{4,8} = S_i$ $L_{3,8} \neq S_i$ $L_{2,8} = S_i$ $L_{1,9} \neq S_i$	да
9	50,9	0,1	$L_{8,9} = 320$ $L_{7,9} = 620$ $L_{6,9} = 920$ $L_{5,9} = 1120$ $L_{4,9} = 1420$ $L_{3,9} = 1520$ $L_{2,9} = 1820$ $L_{1,9} = 1920$	$L_{8,9} \neq S_i$ $L_{7,9} = S_i$ $L_{6,9} \neq S_i$ $L_{5,9} = S_i$ $L_{4,9} \neq S_i$ $L_{3,9} = S_i$ $L_{2,9} \neq S_i$ $L_{1,9} = S_i$	да
10	56,9	0,2	$L_{9,10} = 320$ $L_{8,10} = 620$ $L_{7,10} = 920$ $L_{6,10} = 1120$ $L_{5,10} = 1420$ $L_{4,10} = 1520$ $L_{3,10} = 1820$ $L_{2,10} = 1920$ $L_{1,10} = 2220$	$L_{9,10} \neq S_i$ $L_{8,10} = S_i$ $L_{7,10} \neq S_i$ $L_{6,10} = S_i$ $L_{5,10} \neq S_i$ $L_{4,10} = S_i$ $L_{3,10} \neq S_i$ $L_{2,10} = S_i$ $L_{1,10} \neq S_i$	да

В момент времени с начала протягивания провода $t_1 = 12,4$ с было обнаружено первое замыкание. Оно продолжалось до $t_2 = 12,5$ с. На выходе усилителя 16 за время $T_1 = t_2 - t_1 = 12,5 - 12,4 = 0,1$ с появилось 20 импульсов скорости. Поскольку до момента времени t_1 никакого замыкания в схеме не было обнаружено, то $L_{jk} = 0$. Нейронная сеть 17 сравнила величину $L_{jk} = 0$ с каждым из вариантов S_i , приведенных выше. Поскольку L_{jk} не равнялось ни одному из приведенных выше вариантов расстояний, т.е. $L_k \neq S_i$, то на ключевое устройство 22 из нейронной сети 17 запрещающего сигнала не поступало и импульсы, задержанные в линии задержки 23, прошли в счетчик 19 протяженности дефектов и на вход формирователя импульса дефекта 18, на выходе которого появился импульс дефекта длительностью $T_1 = 0,1$. В счетчик 19 прошло 20 импульсов скорости, которые соответствовали протяженности дефекта $l_1 = l_2 \times n_1 = 0,25 \times 20 = 5$ мм. Счетчик 20 посчитал 1 дефект.

Второе и последующие замыкания жилы провода в одном из нанесенных дефектов с различными элементами намоточного оборудования и рассмотрение вариантов анализа, которые происходили в обученной нейронной сети, отображены в приведенной ниже таблице.

В момент времени $t_3 = 18,5$ с произошло второе замыкание жилы провода в одном из дефектов с каким-то элементом намоточного станка. С этого момента на выходе высокоомного усилителя 16 появилась серия из 40 импульсов скорости, которая продолжалась до момента времени $t_4 = 18,7$ с. С момента времени t_1 до момента времени t_3 в счетчик 22 длины проконтролированного провода поступило 1200 импульсов, что соответствовало расстоянию $L_k = 300$ мм, которое прошел провод после первого, выявленного в момент времени t_1 контакта жилы провода в дефектном участке изоляции с каким-то элементом намоточного станка.

Поскольку $L_k = 300$ мм не равнялось ни одному из приведенных выше вариантов расстояний, т.е. $L_k \neq S_i$, то на ключевое устройство 22 из нейронной сети 17 никакого сигнала не поступало, и импульсы скорости с выхода высокоомного усилителя 16, задержанные в линии задержки 23, прошли в формирователь импульса дефекта 18 и на входы счетчиков 19 и 20. Счетчик количества дефектов 20 зарегистрировал второй дефект, а счетчик 19 протяженности дефектов, в котором было подсчитано 40 импульсов скорости, показал, что протяженность обнаруженного второго дефекта $l_2 = l_1 \times n_2 = 0,25 \times 40 = 10$ мм.

Аналогичная процедура анализа и выработки решений в нейронной сети при каждом очередном замыкании жилы провода в одном из дефектов отображена в таблице.

В результате проведенного контроля провода с нанесенными в его изоляции двумя искусственными дефектами с использованием устройства (рис. 1), реализующего рассматриваемый способ, было зарегистрировано 2 дефекта, один из которых имел протяженность 5 мм, а другой — 10 мм.

Таким образом, по сравнению с известными ранее измерителями дефектности изоляции обмоточных проводов, предлагаемое устройство позволяет производить контроль реального процесса намотки обмоток электротехнических изделий с гальванической развязкой элементов и для его реализации отпадает необходимость специального изготовления датчика дефектов, исключается необходимость использования высокого напряжения для питания датчика дефектов, исчезает необходимость очистки от изоляции одного из концов провода и подсоединения его к общей шине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Г. В. *Пооперационный контроль процесса изготовления обмоток электрических машин*. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия — Телеком»; 2018. 156 с.
2. Хомутов С. О., Семичевский П. И., Кобозев Е. В. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов. *Ползуновский вестник*. 2009;1–2:220–229.
3. Смирнов Г. В., Смирнов Д. Г. Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горношахтного и нефтепромышленного оборудования. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016;327(2):102–116.4.
4. Курбатова О. А., Павлюченко В. М. *Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования*. Владивосток: Изд-во ДВГТУ; 2004. 286 с.
5. Колмаков Е. А., Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти. *Вестник КузГТУ*. 2016;1:150–155.
6. Каширских В. Г., Гаргаев А. Н., Завьялов В. М., Семькина И. Ю. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов. *Вестник КузГТУ*. 2016;6:159–168.
7. Русский Е. Ю. Анализ прочности роторов шахтных осевых вентиляторов. *Вестник КузГТУ*. 2015;2:31–34.
8. Герике П. Б. Определение дефектов динамического оборудования тяговых лебедок экскаваторов типа драглайн по параметрам механических колебаний. *Вестник КузГТУ*. 2014;1:21–26.
9. Андрианов В. К., Васильев Е. Б. Состояние производства и научно-технические аспекты развития обмоточных проводов в России. *Кабели и провода*. 2014;5:3–6.
10. Бесперстов П. П., Заикин А. И., Пугачев К. Г., Кириллов Ю. А. Авторское свидетельство СССР № 1665320А1, кл. G01N27/68. Опубл. 23.07.91. Бюл. № 27.

11. Патент РФ 2737515 (по заявке 2020107811 от 21.02.20.) *Способ контроля дефектности изоляции обмоточных проводов* / Смирнов Г. В. Оpubл. 01.12.2020. Бюл. № 34.
12. Замятин Н. В., Смирнов Г. В. *Нейронные компьютерные системы и их применение*. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники; 2021. 316 с.