

встроенной коррекции амплитудно-частотной характеристики.

Эти особенности ОУ приводят к увеличению длительности фронта нарастания выходного напряжения при включении ОУ по схеме ЗЧУ и затрудняют регистрацию коротких токовых сигналов.

Целью настоящей работы является разработка комплекта аналоговых микросхем с входным JFET, обеспечивающих обработку сигналов различных высокоимпедансных датчиков.

Конструктивно-схемотехнические особенности разработанных микросхем. Для обеспечения требуемых параметров и экономической эффективности при малосерийном производстве применены следующие технические решения:

- разработана топология экспериментального образца БК, который содержит активные и пассивные элементы, обеспечивающие реализацию всех указанных ОУ. Ряд элементов БК выполнен в виде наборов, соединения между которыми выполняются с применением пережигаемых перемычек или различных комплектов фотошаблонов;

- спроектированы ОУ (основной NJAmp1, маломощный NJAmp2, со сверхмалым входным током NJAmp4), содержащие унифицированные схемные каскады, допускающие варьирование параметров ОУ путем изменения номиналов минимального количества интегральных элементов.

Таблица 1 – Основные параметры ОУ

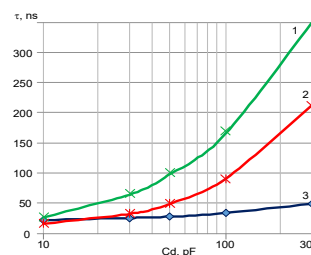
Параметр	Наименование усилителя		
	NJAmp1	NJAmp2	NJAmp4
Напряжение питания, В	0/5	0/5	0/5
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	0,58	0,44	1,43
Напряжение смещения нуля, мВ	-0,034	-0,114	0,006
Диапазон выходного напряжения, В	от 0,13 до 4,9	от 0,11 до 4,83	от 0,13 до 4,9
Коэффициент усиления напряжения	$9,4 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^5$
Входной ток, пА	15,0	15,0	0,3
Площадь усиления, МГц	3,3	3,4	2,4
Минимальный запас по фазе в полосе пропускания, град	60	71	72

Результаты схемотехнического моделирования. Параметры, характеризующие разработанные микросхемы, показаны в таблицах 1, 2

и на рисунках 1, 2. Для сравнения приведены данные для интегрального ЗЧУ с мощным входным *p*-JFET [1]. Заметим, что ЗЧУ, выполненный на ОУ типа NJAmp1, при $C_D = 10$ пФ имеет длительность фронта нарастания 474 нс, что значительно больше, чем для CSP1 и CSP2.

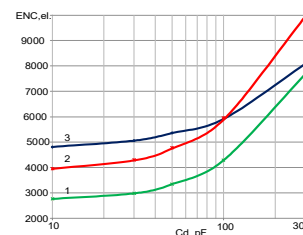
Таблица 2 – Основные параметры ЗЧУ

Параметр	Наименование ЗЧУ		
	CSP1	CSP2	[1]
Ток стока входного JFET, мА	0,467	2,527	5,613
Крутизна входного JFET, мА/В	1,675	3,688	17,72
Ток потребления, мА	0,85	2,653	6,990
Коэффициент усиления напряжения на низкой частоте	1478	2532	4430



1 – CSP1, 2 – CSP2, 3 – известный ЗЧУ [1]

Рисунок 1 – Зависимость длительности фронта нарастания ЗЧУ τ от емкости датчика C_D



1 – CSP1, 2 – CSP2, 3 – известный ЗЧУ [1]

Рисунок 2 – Зависимость эквивалентного шумового заряда ENC от емкости датчика C_D

Литература

1. Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets / O. V. Dvornikov [et al.] // 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. – 2020. – P. 1–6.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Громыко И. Л.

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Аннотация. В настоящее время, существует множество методов диагностики трансформаторов. Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на достижение определенной сложности дальнейшего развития существующих методов и диагностических систем. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом входных факторов, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Одним из наиболее перспективных видов диагностики, на сегодняшний момент, является анализ частотных характеристик (FRA). В данной работе, для обнаружения дефектов обмоток, предлагается новый метод, на основе метода трех вольтметров и сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: трансформатор, частотные характеристики, метод трех вольтметров, сверточные нейронные сети.

TRANSFORMER CONDITION ANALYSIS USING FREQUENCY CHARACTERISTICS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Hramyka I. L.

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

Abstract. Currently, numerous different methods for transformer diagnostics exist. An analysis of the methods and diagnostic systems used indicates that further development of existing methods and diagnostic systems has reached a certain level of complexity. This is due to the complexity of input signals, a relatively large number of input factors, and nonlinear multiple dynamic relationships with other parameters. One of the most promising diagnostic methods currently available is frequency response analysis (FRA). In this paper, a new method based on the three-voltmeter method and convolutional neural networks is proposed for detecting winding defects.

Keywords: transformer, frequency response, three-voltmeter method, convolutional neural networks.

Адрес для переписки: Громыко И. Л., ул. Громоной, 3, кв. 27, г. Гомель 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangromyko@mail.ru

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа [1], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [2], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, FRA и другие. В последнее время FRA привлекает все больше внимания для обнаружения механических повреждений из-за его высокой чувствительности к деформациям обмоток трехфазных трансформаторов [3].

В данном материале представлен новый метод обнаружения неисправностей трансформатора, с использованием импедансной и фазо-частотной характеристики, а также сверточных нейронных сетей. Данный метод является продолжением методики, описанной в статье [4]. С помощью метода трех вольтметров рассчитывается модуль и аргумент комплексного сопротивления трансформатора в режиме холостого хода, в диапазоне от 0 до 100 кГц. Используя алгоритм линейной нормализации и библиотеку компьютерного зрения OpenCV, были получены изображения импедансной и фазо-частотной характеристик, которые затем подавались на вход сверточной нейронной сети (рисунок 1).



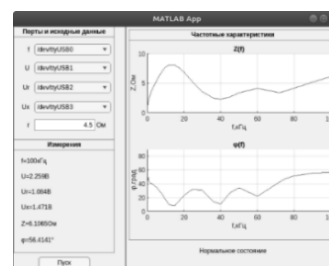
Рисунок 1 – Изображения импедансной (а) и фазо-частотной характеристик (б) нормального состояния трансформатора

Для идентификации неисправности, в данном методе используются две сверточные нейронные сети LeNet: первая сеть отвечает за идентификацию неисправностей по импедансной характеристике, а вторая – по фазо-частотной. Обучение нейронных сетей проводилось на изображениях, разбитых на три класса:

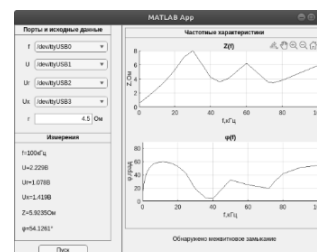
- класс 0 – нормальное состояние;
- класс 1 – межвитковое короткое замыкание;
- класс 2 – межфазное замыкание.

Каждая из нейронных сетей на выходе выдает номер одного из классов. После обработки изображений нейронными сетями, происходит окончательный анализ, который указывает вид неисправности.

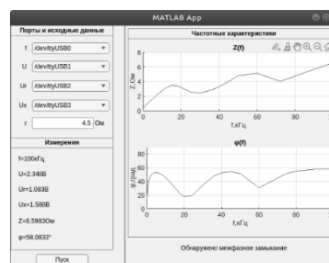
На основе данного метода было разработано программное обеспечение, позволяющее своевременно обнаружить неисправность в трансформаторе (рисунок 2).



а



б



в

Рисунок 2 – Результат работы программы при нормальном состоянии (а), межвитковом коротком замыкании (б) и межфазном замыкании (в)

Данное программно-аппаратное обеспечение было успешно испытано в Белорусском государственном университете транспорта, на трансформаторе ТМ-50/6.

Литература

1. Mahmoudi, N. Experiences with transformer diagnosis by DGA: case studies / N. Mahmoudi, M. H. Samimi, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2019. – Vol. 13, №. 23. – P. 5431–5439.
2. Behjat, V. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonpara-

metric statistical methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2015. – P. 142–148.

3. Samimi, M. H. Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2017. – Vol. 11, №. 1. – P. 218–227.

4. Громыко, И. Л. Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трехфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167.

УДК 53.087.92

ПЕЛЛИСТОРЫ НА ПЛАТФОРМАХ ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Денисюк С. В., Куданович О. Н., Андрухович И. М., Спицкий С. И.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены пеллисторы на платформе из тонкопленочного анодного оксида алюминия с токопроводящими пленочными элементами, выполненными из каталитически активных металлов и сплавов, и пленочным катализатором на основе нитрата алюминия и платино-палладиевой смеси, нанесенным на поверхность рабочей зоны. Использование подложек из анодного оксида алюминия позволяет получать пеллисторы с изолированной рабочей зоной, предотвращающей утечку тепла по подложке и обеспечивающей высокую термомеханическую прочность пеллистора.

Ключевые слова: пеллистор, пленка, катализатор, 3D-печать, анодный оксид алюминия

PELLISTORS BASED ON ANODIC ALUMINA PLATFORM

Dzenisiuk S. V., Kudanovich A. M., Andrukhovich I. M., Spitski S. I.

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus

Abstract. The paper discusses pellistors made on a thin-film aluminium oxide anode platform with conductive film elements made of catalytically active metals and alloys, and a film catalyst based on aluminium nitrate and a platinum-palladium mixture applied to the surface of the working area. The use of anodic aluminum oxide substrates allows the production of pellistors with an isolated working area, which prevents heat leakage through the substrate and ensures high thermomechanical strength of the pellistor.

Keywords: pellistor, film, catalyst, 3D-printing, anodic alumina.

Адрес для переписки: Денисюк С. В., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: denisuc@oelt.basnet.by

Термокаталитические сенсоры (пеллисторы) используются для детектирования горючих газов более чем 50 лет [1]. Впервые они были применены в шахтах для детектирования метана. Отличительными особенностями таких устройств являются простота и относительная стабильность параметров. Чувствительный элемент таких приборов представляет собой миниатюрный микрокалориметр, включающий металлический терморезистор (как правило, в качестве материала используется платина в виде проволоки) со сформированным на нем носителем (чаще всего из оксида алюминия), в поверхностном слое которого распределен катализатор для снижения температуры термокаталитической реакции на поверхности рабочей области датчика, что снижает уровень энергопотребления.

Дальнейшего уменьшения энергопотребления можно достичь при тонкопленочном исполнении пеллистора. В настоящей работе рассмотрен вариант возможного такого исполнения.

Изготовление образцов пеллисторов состоит из нескольких основных операций: получение

подложки с высокой химической и термической стабильностью, нанесение пленочных элементов пеллистора, получение активного слоя, на котором может происходить термокаталитическая реакция, изготовление корпуса, монтаж подложки с нанесенными функциональными элементами.

Изготовление подложек начинается с проката алюминиевых пластин до фольги требуемой толщины (около 100 микрон). Затем пластины алюминия проходят процессы рихтовки, очистки и полировки для придания плоскостности и удаления всех примесей, которые могли образоваться на поверхности заготовок. После этого алюминий анодируется до требуемой толщины (40 микрон). Методами фотолитографии и локального травления на поверхности анодного оксида алюминия формируется заданная топология подложек пеллистора. Особенностью разработанной конструкции является наличие изолированной рабочей области, на которой происходит термокаталитическая реакция. Затем с использованием жидкостного травления эти подложки отделяются от алюминиевой основы. На