

УДК 621.317.799
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛА ВИТКОВ КАТУШЕК ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. И. Нефедьев¹, А. А. Трофимов², И. В. Самофалов³

^{1,3} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ nefediev@rambler.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ sem3436@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В процессе изготовления трансформаторов выполняется множество операций контроля технологических операций, таких как соответствие размеров обмоточного провода, его натяжение, плотность намотки, размеры катушки, расположение и правильность выполнения переходов из одной катушки в другую, направление намотки, качество пайки и изоляции. *Материалы и методы.* Рассмотрены различные устройства, имеющие в своем составе ферромагнитный сердечник с обмоткой возбуждения и эталонной катушкой. Устройства такого типа обычно характеризуются относительно небольшими размерами, что ограничивает максимальный размер контролируемых катушек, и погрешностью от изменения среднего диаметра контролируемых катушек из-за неравномерности магнитного поля в пределах рабочего участка. Важной операцией является проверка количества витков обмоток трансформатора. *Результаты и выводы.* Для повышения точности измерения числа витков катушек индуктивности и расширения функциональных возможностей за счет измерения числа витков обмоток трансформаторов на тороидальных сердечниках после завершения технологической операции намотки было разработано измерительное устройство с погрешностью ± 2 витка в диапазоне от 100 до 1000 витков и ± 4 витка в диапазоне до 1000–10000 витков, что позволяет уменьшить количество брака при их производстве.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, количество витков, ферромагнитный сердечник, образцовая катушка, контролируемая катушка, погрешность измерения

Для цитирования: Нефедьев А. И., Трофимов А. А., Самофалов И. В. Устройства для измерения числа витков катушек трансформаторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 53–58. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

DEVICES FOR MEASURING THE NUMBER OF TRANSFORMER COILS

A.I. Nefediev¹, A.A. Trofimov², I.V. Samofalov³

^{1,3} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ nefediev@rambler.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ sem3436@yandex.ru

Abstract. *Background.* In the process of manufacturing transformers, many operations are performed to control technological operations, such as matching the size of the winding wire, its tension, winding density, coil dimensions, location and correctness of transitions from one coil to another, winding direction, soldering and insulation quality. *Materials and methods.* Various devices are considered, which include a ferromagnetic core with an excitation winding and a reference coil. Devices of this type are usually characterized by relatively small dimensions, which limits the maximum size of the controlled coils, and by an error from a change in the average diameter of the controlled coils due to the non-uniformity of the magnetic field within the working area. An important operation is to check the number of turns of the transformer windings. *Results and conclusions.* To improve the accuracy of measuring the number of turns of inductors and expand functionality by measuring the number of turns of windings of transformers on toroidal cores after the completion of the winding process, a measuring device was developed with an error of ± 2 turns in the range from 100 to 1000 turns, and ± 4 turns in the range up to 1000–10000 turns, which allows to reduce the amount of rejects in their production.

Keywords: transformer, winding, number of turns, ferrimagnetic core, reference coil, controlled coil, measurement error

For citation: Nefediev A.I., Trofimov A.A., Samofalov I.V. Devices for measuring the number of transformer coils. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):53–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

В процессе изготовления трансформаторов выполняется множество операций контроля технологических операций, таких как соответствие размеров обмоточного провода, его натяжение, плотность намотки, геометрические размеры катушки, расположение и правильность выполнения переходов из одной катушки в другую, направление намотки, качество пайки и изоляции, контроль активного сопротивления и числа витков. Каждая обмотка перед снятием ее со станка также проверяется на отсутствие межобмоточных замыканий [1, 2].

Важной операцией технического контроля является проверка количества витков обмоток трансформатора. Эту проверку часто проводят при выходном контроле на изготовленном трансформаторе путем сравнения напряжений с аналогичной обмоткой образцового трансформатора. При этом отличие выходных напряжений не должно превышать $\pm(0,5-1) \%$ в соответствии с ГОСТ 11677-85¹. Таким образом, операция контроля числа витков в готовой обмотке является важной. Для снижения затрат при изготовлении трансформаторов необходимо производить данную операцию до сборки трансформатора.

Известно много устройств, позволяющих контролировать число витков катушек трансформаторов, электромагнитов и других индуктивных устройств до сборки.

Большинство таких устройств основано на методе сравнения напряжения испытуемой и образцовой катушек, и обычно их конструкция содержит ферромагнитный сердечник, на котором располагаются эталонная катушка, контролируемая катушка и обмотка возбуждения. От особенностей конструкции такого устройства в значительной степени зависят точность измерения числа витков, стабильность показаний, диапазон размеров контролируемых катушек, удобство эксплуатации и ряд других факторов.

Рассмотрим несколько таких устройств, имеющих ферромагнитный сердечник с обмоткой возбуждения и эталонной катушкой. Устройства такого типа обычно характеризуются относительно небольшими размерами, что ограничивает максимальный размер контролируемых катушек, и погрешностью от изменения среднего диаметра контролируемых катушек из-за неравномерности магнитного поля в пределах рабочего участка.

На рис. 1 представлен трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек [3], в основе которого находится ферромагнитный прямолинейный сердечник С, обмотка возбуждения ОВ, компенсационные катушки КК1 и КК2, расположенные по обе стороны от испытуемой ИК и эталонной ЭК катушек. Компенсационные катушки соединены последовательно и согласно между собой и обмоткой возбуждения, и подключены к источнику переменного напряжения $\sim U$.

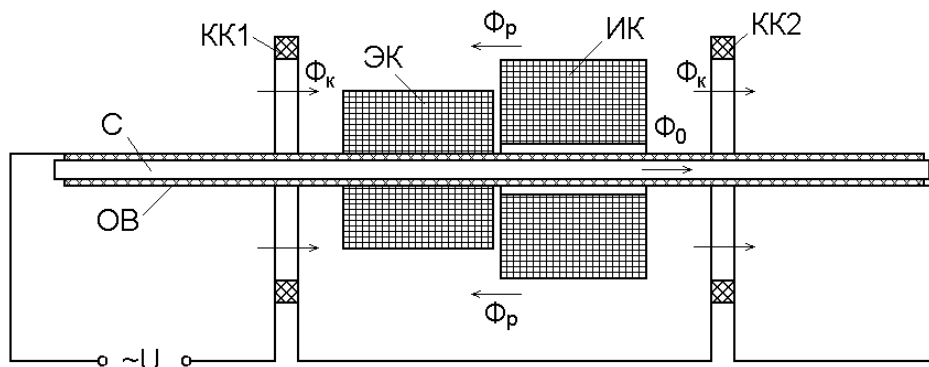


Рис. 1. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек

Магнитный поток состоит из основного потока возбуждения Φ_0 , проходящего по ферромагнитному сердечнику, т.е. $\Phi_0 = f(I)$, потока рассеяния Φ_p и потока Φ_k , создаваемого компенсационными катушками. Значение потока рассеяния Φ_p зависит от взаимного расположения катушек.

Витки эталонной и контролируемой катушек охватывает магнитный поток

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_p + \Phi_k.$$

¹ ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

В результате сложения потока рассеяния и встречного ему компенсационного потока ЭДС, наводимая в витках эталонной и контролируемой катушек, слабо зависит от расположения контролируемой катушки относительно середины сердечника, что приводит к уменьшению погрешности измерения.

На рис. 2 представлен трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек [4], основанный на компенсационном способе измерения. Устройство содержит ферромагнитный сердечник С с расположенной на нем и равномерно распределенной основной обмоткой возбуждения ОВ, секционированной катушкой эталонных витков ЭК и контролируемой катушкой КК.

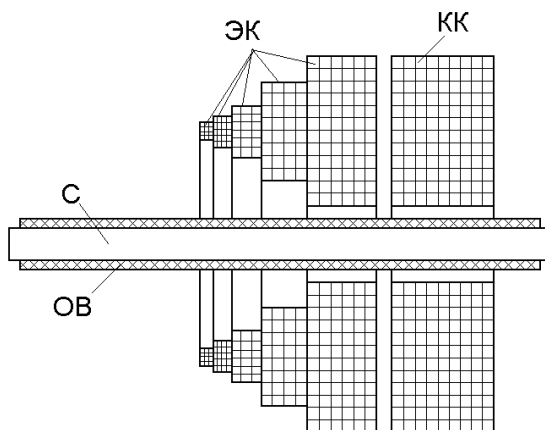


Рис. 2. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек

Для уменьшения основной погрешности секции катушки эталонных витков имеют одинаковый средний диаметр, равный среднему диаметру обмотки контролируемой катушки.

Погрешность устройства увеличивается как при увеличении числа витков эталонной и контролируемой катушек, так и при увеличении расстояния между ними.

На рис. 3 представлено устройство для измерения числа витков катушек [5]. Устройство содержит ферромагнитный сердечник 1, на котором находятся обмотка возбуждения 2, обмотка обратной связи 3 и контролируемая катушка 4. Устройство также содержит усилитель 5, управляемый делитель 6, диодный компаратор 7, источник переменного напряжения 8, источник опорного напряжения 9, измеритель числа витков 10.

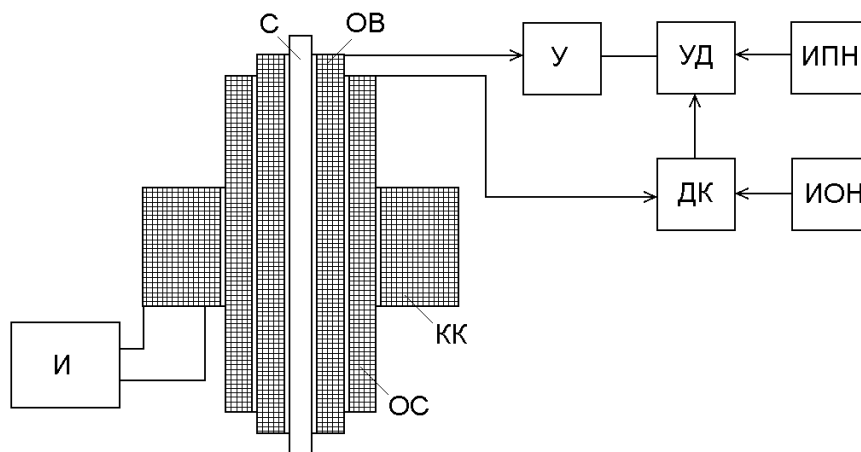


Рис. 3. Устройство для измерения числа витков катушек

При работе устройства переменное напряжение с источника переменного напряжения через управляемый делитель подается на усилитель, нагрузкой которого является обмотка возбуждения трансформаторного датчика. Напряжение с обмотки возбуждения поступает на диодный компаратор, сравнивается с опорным напряжением и подается на управляемый делитель. Такая система позволяет автоматически поддерживать постоянным магнитный поток, что

снижает погрешность от температурных изменений магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника, что повышает точность измерений при автоматизации процесса измерения.

Для повышения точности измерения числа витков катушек и расширения функциональных возможностей за счет измерения числа витков обмоток трансформаторов на тороидальных сердечниках было разработано устройство для измерения числа витков катушек индуктивности [6], схема которого представлена на рис. 4.

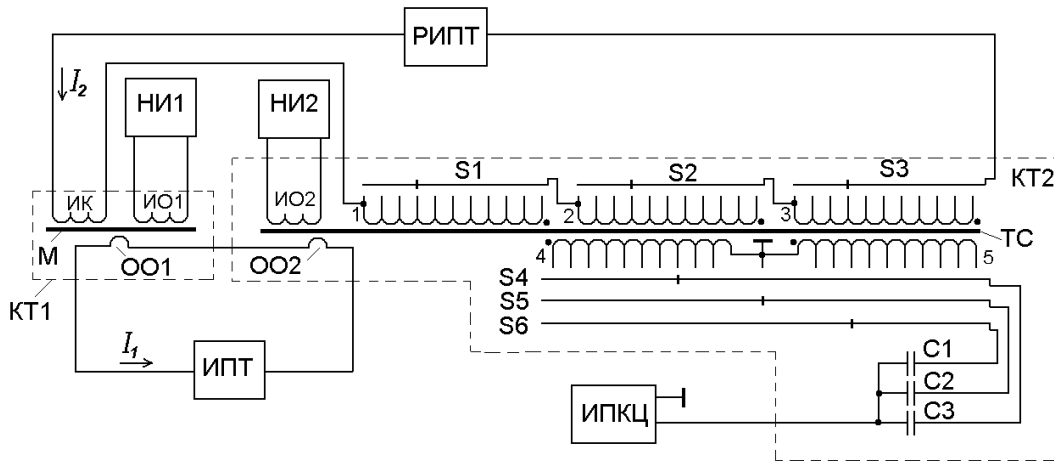


Рис. 4. Устройство для измерения числа витков катушек индуктивности

Устройство содержит первый компаратор КТ1 тока, который состоит из испытуемой катушки (обмотки) ИК, надетой на П-образный разъемный магнитопровод М при измерении числа витков испытуемой катушки (или намотанный на тороидальный сердечник М при измерении числа витков обмоток трансформаторов), через которые проходит проводник или намотана образцовая обмотка ОО1, индикаторной обмотки ИО1 и первого нулевого индикатора НИ1.

Второй компаратор тока КТ2 состоит из тороидального магнитного сердечника ТС и секционированных образцовых декадных обмоток 1–3 с тесной индуктивной связью, число включенных секций которых определяется переключателями S1–S3 соответственно.

На магнитопроводе второго компаратора тока также расположены квадратурные обмотки 4 и 5, которые через переключатели S4–S6 и конденсаторы C1, C2 и C3 соответственно подключены к источнику питания квадратурной цепи ИПКЦ, а также индикаторная обмотка ИО2, к которой подключен второй нулевой индикатор НИ2, реагирующий на первую гармонику тока, проходящего через образцовую обмотку ОО2. К источнику переменного тока ИПТ присоединены последовательно соединенные обмотки ОО1 и ОО2. К регулируемому источнику переменного тока с возможностью регулирования фазы РИПТ подключены испытуемая катушка ИК и образцовые обмотки 1–3.

Обмотки 1–3 выполнены в виде магазина обмоток, причем секции обмотки 1 содержат в десять раз больше витков, чем секции обмотки 2, секции которой, в свою очередь, содержат в десять раз больше витков, чем секции обмотки 3. В зависимости от конкретных требований к устройству число витков в магазине обмоток может быть отличным от показанного на рис. 4.

Емкости конденсаторов C1, C2 и C3 выбраны таким образом, что емкостной ток через конденсатор C1 в десять раз превышает ток через конденсатор C2, а ток через конденсатор C2 в десять раз превышает ток через конденсатор C3.

Испытуемая катушка ИК, обмотки ОО1, ОО2 и обмотки 1, 2, 3 соединены таким образом, что потоки в сердечниках компараторов токов КТ1 и КТ2 направлены встречно. Компаратор КТ1 состоит из разъемного сердечника М с высокой магнитной проницаемостью, на который надеты испытуемая катушка ИК и индикаторная обмотка ИО1.

При измерении числа витков обмоток трансформаторов с тороидальными сердечниками в качестве индикаторной обмотки ИО1 используется одна из обмоток трансформатора. Первичные обмотки ОО1 и ОО2 могут состоять из одного или нескольких витков. Частоты токов I_1 и I_2 выбираются исходя из размеров и материала сердечника М компаратора КТ1 и обусловленного этим чувствительности компаратора.

При работе устройства в первичной цепи компараторов КТ1 и КТ2, образованной витками обмоток ОО1 и ОО2, от источника ИПТ течет переменный ток I_1 . Через испытуемую катушку ИК и образцовые обмотки 1–3 протекает переменный ток I_2 , который регулируется по величине и фазе таким образом, что магнитный поток в магнитопроводе М компаратора КТ1 равен нулю, что определяется по нулевому индикатору НИ1.

Затем при помощи переключателей S1–S3 путем изменения числа включенных витков образцовых обмоток 1–3 добиваются компенсации синфазной составляющей магнитного потока в магнитопроводе ТС компаратора КТ2. Далее при помощи переключателей S4–S6 путем изменения числа включенных обмоток 4 и 5 добиваются компенсации квадратурной составляющей магнитного потока в магнитопроводе ТС компаратора КТ2. Равенство нулю магнитного потока в магнитопроводе ТС определяется по нулевому индикатору НИ2. Обмотки 4 и 5 соединены таким образом, что токи через них, сдвинутые при помощи конденсаторов С1–С3 на 90° относительно тока I_1 , обеспечивают компенсацию квадратурной составляющей потока любой фазы.

Источник переменного тока ИПТ предназначен для питания квадратурной цепи компаратора тока КТ2. Фазовый сдвиг между токами I_1 и I_2 обусловлен потоками рассеяния в компараторе КТ1. Количество витков испытуемой катушки ИК определяется по показанию декад с образцовыми обмотками 1–3. Нулевые индикаторы НИ1 и НИ2 имеют в своем составе полосовые фильтры и реагируют только на первую гармонику токов I_1 и I_2 .

В процессе измерения числа витков при помощи компараторов тока определяется отношение токов из выражения

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_{U2}}{w_{U1}} = \frac{w_{02}}{w_{01}},$$

где w_{U2} – число витков первичной обмотки испытуемого трансформатора; w_{U1} – число витков испытуемой катушки компаратора; w_{01} – число витков первичной обмотки второго компаратора; w_{02} – число витков вторичной обмотки второго компаратора.

Высокая точность устройства обусловлена тем, что переменный ток I_1 , проходящий через первичные обмотки компараторов КТ1 и КТ2, и ток I_2 , проходящий через их вторичные обмотки, не измеряется. Погрешность данного устройства зависит от диапазона измерения и составляет ± 2 витка в диапазоне от 100 до 1000 витков и ± 4 витка в диапазоне от 1000 до 10000 витков (рис. 5).

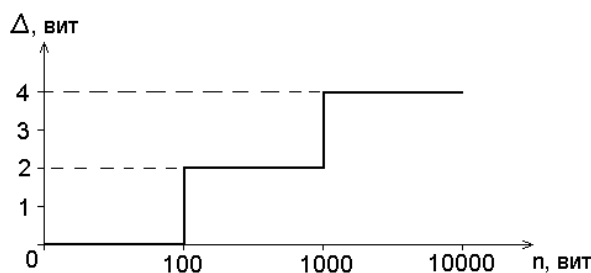


Рис. 5. График абсолютной погрешности устройства для измерения числа витков катушек индуктивности

Таким образом, рассмотренные устройства для контроля числа витков позволяют измерить число витков намотанной катушки после завершения технологической операции намотки до сборки трансформатора [7], что позволяет уменьшить количество брака при их производстве.

Список литературы

1. Мазель К. Б. Трансформаторы электропитания. М. : Энергоиздат, 1982. 80 с.
2. Герасимова Л. С., Дайнега И. А., Пшеничный Г. И., Чечелюк Я. З. Технология и механизация производства обмоток и изоляции силовых трансформаторов. М. : Энергия, 1979. 336 с.
3. А.с. СССР 440618, МПК G01R 29/20. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек / Солнцев В. А. № 1716793/24-7 ; заявл. 22.11.71 ; опубл. 25.08.74, Бюл. № 31.
4. А.с. СССР 473966, МПК G01R 29/20. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек / Солнцев В. А. № 1680150/24-7 ; заявл. 06.07.71 ; опубл. 14.06.75, Бюл. № 22.

5. А.с. СССР 708263, МПК G01R 29/20. Устройство для измерения числа витков катушек / Казлаускене Э. В., Мартинайтис Г. И., Корбутович Р. З. № 2491541/18-21 ; заявл. 01.06.77 ; опубл. 05.01.80, Бюл. № 1.
6. А.с. СССР 1653435, МПК G01R 29/20. Устройство для измерения числа витков катушек индуктивности / Неведьев А. И. № 4480979/21 ; заявл. 06.06.89 ; опубл. 01.02.91.
7. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М. : Энергоиздат, 2004. 616 с.

References

1. Mazel' K.B. *Transformatory elektropitaniya = Transformers of power supply*. Moscow: Energoizdat, 1982:80. (In Russ.)
2. Gerasimova L.S., Daynega I.A., Pshenichnyy G.I., Chechelyuk Ya.Z. *Tekhnologiya i mekhanizatsiya proizvodstva obmotok i izolyatsii silovykh transformatorov = Technology and mechanization of production of windings and insulation of power transformers*. Moscow: Energiya, 1979:336. (In Russ.)
3. CC USSR 440618, IPC G01R 29/20. *Transformatornyy datchik dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Transformer sensor for measuring the number of turns of coils*. Solntsev V.A. № 1716793/24-7; appl. 22.11.71; publ. 25.08.74, Bull. № 31. (In Russ.)
4. CC USSR 473966, IPC G01R 29/20. *Transformatornyy datchik dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Transformer sensor for measuring the number of turns of coils*. Solntsev V.A. № 1680150/24-7; appl. 06.07.71; publ. 14.06.75, Bull. № 22. (In Russ.)
5. CC USSR 708263, IPC G01R 29/20. *Ustroystvo dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Device for measuring the number of turns of coils*. Kazlauskene E.V., Martinaytis G.I., Korbutovich R.Z. № 2491541/18-21; appl. 01.06.77; publ. 05.01.80, Bull. № 1. (In Russ.)
6. CC USSR 1653435, IPC G01R 29/20. *Ustroystvo dlya izmereniya chisla vitkov katushek induktivnosti = Device for measuring the number of turns of inductors*. Nefed'ev A.I. № 4480979/21; appl. 06.06.89; publ. 01.02.91. (In Russ.)
7. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. (ed.). *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga = Power transformers. Reference book*. Moscow: Energoizdat, 2004:616. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Иванович Неведьев

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, пр-т имени В. И. Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Alexey I. Nefediev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иван Владимирович Самофалов

магистрант,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, пр-т имени В. И. Ленина, 28)
E-mail: sem3436@yandex.ru

Ivan V. Samofalov

Master degree student,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 05.03.2023

Принята к публикации/Accepted 10.04.2023