

УДК 621.317.7

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОЛЩИНЫ НАМОТКИ ИЗОЛЯЦИИ
НА ВРАЩАЮЩИЕСЯ ОПРАВЫ**

**THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC
TRANSDUCERS OF THICKNESS OF THE WINDING ISOLATION ON
THE ROTATING FRAMES**

©Сейдалиев И. М.

канд. техн. наук

Азербайджанский государственный экономический университет

г. Баку, Азербайджан

ilham.seydaliyev@mail.ru

©Seydaliyev I.

PhD

Azerbaijan State Economic University

Baku, Azerbaijan,

ilham.seydaliyev@mail.ru

Аннотация. В работе показаны существующие проблемы в области контроля толщины изоляции цилиндрических оправ в процессе автоматической намотки. А также проанализированы методы контроля толщины стеклоизоляции стальных и пластмассовых оправ, применяемые в электротехнической промышленности. С этой целью рекомендуются электромагнитные преобразователи перемещений индуктивного и трансформаторного типа. Рассмотрены принципы работы, физические модели, области применения различных типов электромагнитных преобразователей неэлектрических величин в электрические. Приведено сравнение характеристики основных типов электромагнитных преобразователей толщины стеклоизоляции оправ, показаны их относительные преимущества и недостатки.

Abstract. The winding of isolation on the steel and plastic cylindrical frames is applied in the electrotechnical industry. In the topic the control methods and problems for isolation thickness have given. For this purpose, the electromagnetic transducers of the inductive and transformer type displacement have recommended. The principles of operation, physical models and application areas of the transducers have considered in here. The characteristics of the main types of electromagnetic transducers that turn thickness of the wrapping isolation on the cylindrical frames into the electrical quantities have compared and given their advantages and disadvantages.

Ключевые слова: электромагнитный преобразователь, индуктивность, магнитная проводимость, магнитное сопротивление, магнитное поле, индукция, чувствительность преобразователя, оправа.

Keywords: electromagnetic transducer, inductance, magnetic conductivity, magnetic resistance, magnetic field, induction, transducer sensitivity, frame.

Контроль толщины после намотки приводит к увеличению отхода дорогостоящей изоляцией и ручного труда, и снижению качества промышленной продукции, основанные на стеклопластиковых элементах, а в процессе намотки она усложняется, хотя основные недостатки при этом исключаются.

Контроль толщины изоляции стальных и пластмассовых оправ в процессе автоматической намотки связана с рядом особенностей, которые можно свести к следующим проблемам [2, 4]:

1. Требуемая степень точности.
2. Однозначное непрерывное преобразование толщины изоляции в электрический сигнал в процессе намотки.
3. Контроль неравномерности намотки требует автоматическое перемещение измерительного устройства вдоль оправы с одновременным преобразованием толщины изоляции в электрический сигнал.
4. Различное поведение отдельной измерительной системы и той же системы, встроенной в измерительную установку.

Анализ характеристик и конструктивных особенностей различных типов преобразователей неэлектрических величин в электрические показали, что лишь некоторые конструкции электромеханических преобразователей перемещений индуктивного и трансформаторного типа выполняют соответствующие требования к преобразователям толщины намотки изоляции на вращающиеся оправы [3, 5, 6]. Их несложно согласовать с оправой как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

Рассмотрим наиболее типичные конструктивные схемы электромеханических преобразователей толщины изоляции и отметим ряд их особенностей [2, 4, 7].

Накладной индуктивный преобразователь (НИП) (Рисунок 1, а) конструктивно достаточно прост и питается от измерительного моста ИМ. Он может свободно перемещаться фторпластовыми роликами вдоль поверхности изоляции. С изменением толщины изоляции ролики поднимают вверх магнитопровод преобразователя, вследствие чего индуктивность обмотки уменьшается.

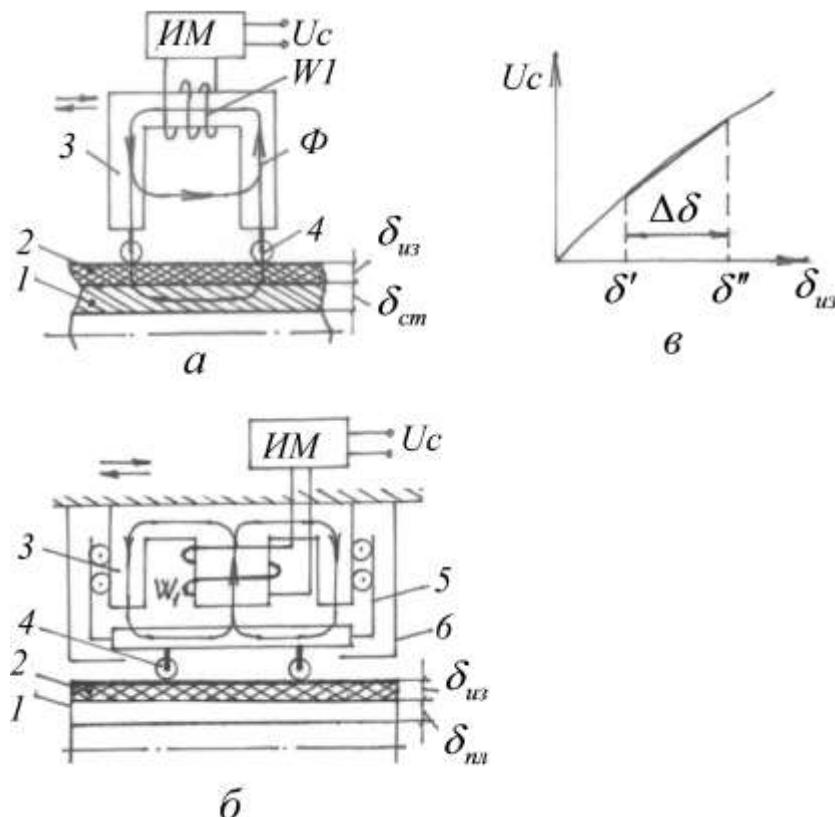


Рисунок 1. Контроль толщины изоляции стальной (а) и пластмассовой (б) оправ индуктивными преобразователями.

Индуктивность обмотки определяется как [1]:

$$L = W_I^2 \left[\Lambda_s + \Lambda_e(\delta_{uz}) + \mu_0 \frac{S_n}{2\delta_{uz}} \right] \cos^2 \theta, \quad (1)$$

где Λ_s и $\Lambda_e(\delta_{uz})$ — магнитная проводимость рассеяния обмотки и магнитная проводимость выпучивания полюса; S_n — площадь сечения полюса; θ — угол потерь в стали оправы, являющийся функцией зазора $\delta=\delta_{iz}$. При малых значениях δ_{iz} угол θ существенно зависит от зазора δ , а проводимость выпучивания Λ_e мала. Поэтому зависимость $L(\delta_{iz})$ существенно нелинейная и преобразователь имеет малую чувствительность при больших значениях зазора $\delta=\delta_{iz}$. При малых зазорах δ_{iz} магнитное сопротивление стали может оказаться больше магнитного сопротивления воздушных зазоров полюсов, причем это увеличивает нелинейность выходного напряжения преобразователя U_c от толщины изоляции δ_{iz} . Основная характеристика преобразователя $U_c(\delta_{iz})$ нелинейная и лишь средний участок этой характеристики более—менее линейный (Рисунок 1, в). Поэтому НИП может быть использован для контроля толщины изоляции в случае, когда толщина изоляции соответствует заданному пределу линейного участка характеристики. Согласование НИП с оправой не представляет никакой трудности.

Индуктивный преобразователь с подвижным сердечником (ИПС) (Рисунок 1, б) содержит якорь, который в исходном положении ($\delta=\delta_{iz}=0$) упирается на Г — образный ограничитель движения б и может свободно перемещаться вверх в процессе намотки изоляции. Поперечные перемещения якоря ограничиваются стержнем 5, который скользит с помощью фторопластового ролика по поверхности магнитопривода 3. Индуктивность обмотки зависит от толщины изоляции и определяется формулой (1), т. е. зависимость $L(\delta_{iz})$ и в этом случае нелинейная. На нелинейность заметно влияют также потери в стали магнитопровода, если зазор $\delta=\delta_{iz}$ мал. Но при этом чувствительность удовлетворительная. При больших зазорах ($\delta \geq 4-6$ мм) чувствительность падает. Основная характеристика $U_c(\delta_{iz})$ нелинейная.

Трансформаторный преобразователь больших линейных перемещений с подвижной сигнальной обмоткой (ТПО) (Рисунок 2, а) имеет удлиненный разомкнутый Ш—образный магнитопровод с однородным магнитным полем рабочего зазора, где свободно может перемещаться вверх сигнальная обмотка W_c . Из-за большого магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора между параллельными стержнями магнитное сопротивление стали незначительно влияет на чувствительность и линейность характеристики $U_c(\delta_{iz})$. Преобразователь позволяет удовлетворительно контролировать толщины порядка 2–100 мм.

Напряжение на зажимах сосредоточенной сигнальной обмотки трансформаторного преобразователя можно определить как

$$\dot{U}_c = -j\omega W_c \left[\Phi_t + 2b \int_0^x B_\delta dx \right] = -j\omega W_c F_l \left[\Lambda_t + 2 \int_0^x \lambda dx \right] = \dot{U}_t + \dot{U}_x, \quad (2)$$

где $F_l=I_l W_l$ — ампервитки обмотки, возбуждающие магнитный поток; Φ_t и Λ_t — торцевой магнитный поток и магнитная проводимость; B_δ — магнитная индукция и λ — удельная магнитная проводимость рабочего воздушного зазора, вдоль которого перемещается сигнальной обмотка; x — координата перемещения сигнальной обмотки; b — толщина магнитопровода; U_t — начальное напряжение сигнальной обмотки, вызванное торцевым магнитным потоком; U_x — полезное напряжение, пропорциональное толщине изоляции $\delta_{iz}=x$.

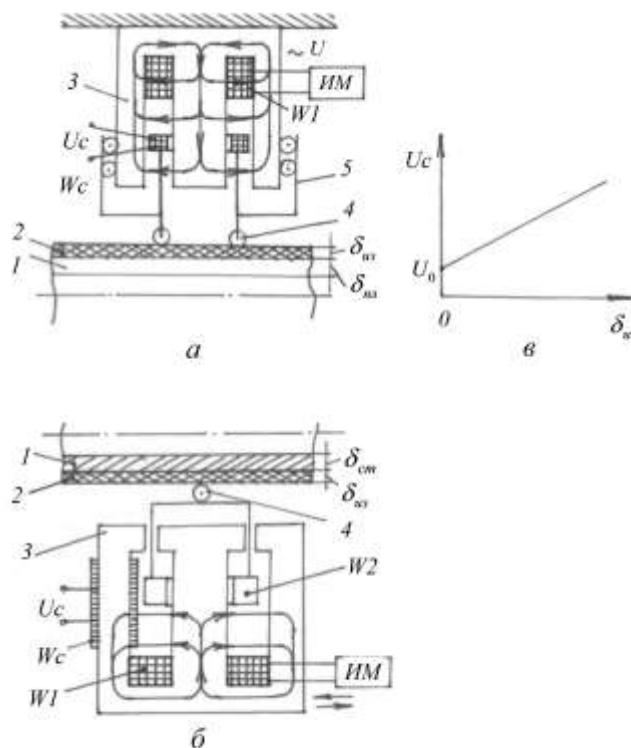


Рисунок 2. Контроль толщины изоляции оправ трансформаторными преобразователями больших линейных перемещений с подвижной обмоткой (а) и левитационным экраном (б).

Для однородного магнитного поля зазора $B_\delta=\text{const}$ и $\lambda=\text{const}$, а напряжение U_t компенсируется опорным напряжением. В этом случае:

$$\dot{U}_c = \dot{U}_x = -j2\omega W_C B_\delta b \delta_{u3} = -j2\omega W_2 F_1 \lambda \delta_{u3}, \quad (3)$$

т. е. зависимость $U_c(\delta_{u3})$ при пренебрежении магнитного сопротивления стали и однородности магнитного поля рабочего зазора линейная.

В ряде случаев выходное напряжение U_c удобно выразить через напряжение питания U_1

$$\dot{U}_c = \dot{U}_t - j\dot{U}_1 \cdot \frac{W_c}{W_\sigma} \cdot \frac{X}{l_c}, \quad (4)$$

где $\sigma = 1 + \frac{h_1}{3l_c}$ — коэффициент рассеяния обмотки возбуждения.

Для дифференциальных трансформаторных преобразователей перемещений:

$$\dot{U}_c = -j\dot{U}_1 \frac{W_c}{W_1 \sigma} \cdot \frac{X}{l_c} \quad (5)$$

Отсюда видно, что чувствительность преобразователя прямо пропорциональна напряжению питания U_1 и числу витков сигнальной обмотки W_c . Но с увеличением напряжения выше допустимого может произойти насыщение участка магнитной цепи, где расположена обмотка возбуждения W_1 . Преобразователь конструктивно прост и легко согласуется с оправой и измерительной системой.

Преобразователи с индукционной левитацией подвижной части могут быть индуктивного, трансформаторного типа (Рисунок 2, б).

Преобразователь содержит удлиненный Ш-образный магнитопровод с обмоткой переменного тока W_1 , левитационным экраном W_2 и сигнальной обмоткой W_c . Левитационный экран под воздействием подъемной силы F_s через фторпластовый ролик 4

упирается на поверхность изоляции. Измеритель выполняет функцию индуктивного преобразователя линейных перемещений (выходной сигнал—ток I_c) или трансформаторного преобразователя линейных перемещений (выходной сигнал—напряжение U_c):

Для линейного участка характеристики $I_c(\delta_{из})$ и $U_c(\delta_{из})$ (Рисунок 2, в) имеем

$$I_c = K_I \delta_{из}; \quad U_c = K_U \delta_{из} \quad (6)$$

В измерительную цепь подключается самопишущий прибор, регистрирующий процесс намотки. Измерительная схема посредством реле связана с приводным двигателем стальной оправы. Это обеспечивает ее автоматическую остановку намотки при достижении необходимой толщины изоляции.

Преобразователи с индукционной левитацией подвижной части просто согласуются с оправой и не требуют сложные детали для передачи перемещений в измерительную систему. Они позволяют контролировать толщины порядка 2–150 мм и имеют высокую чувствительность и линейность характеристики $U_c(\delta_{из})$.

Сравнение характеристик электромеханических преобразователей толщины изоляции. Анализ многочисленных конструктивных типов электромеханических преобразователей перемещений показали, что для автоматизации контроля толщины изоляции оправ успешно могут быть использованы индуктивные и трансформаторные типы преобразователей, схемы которых приведены на Рисунке 3.

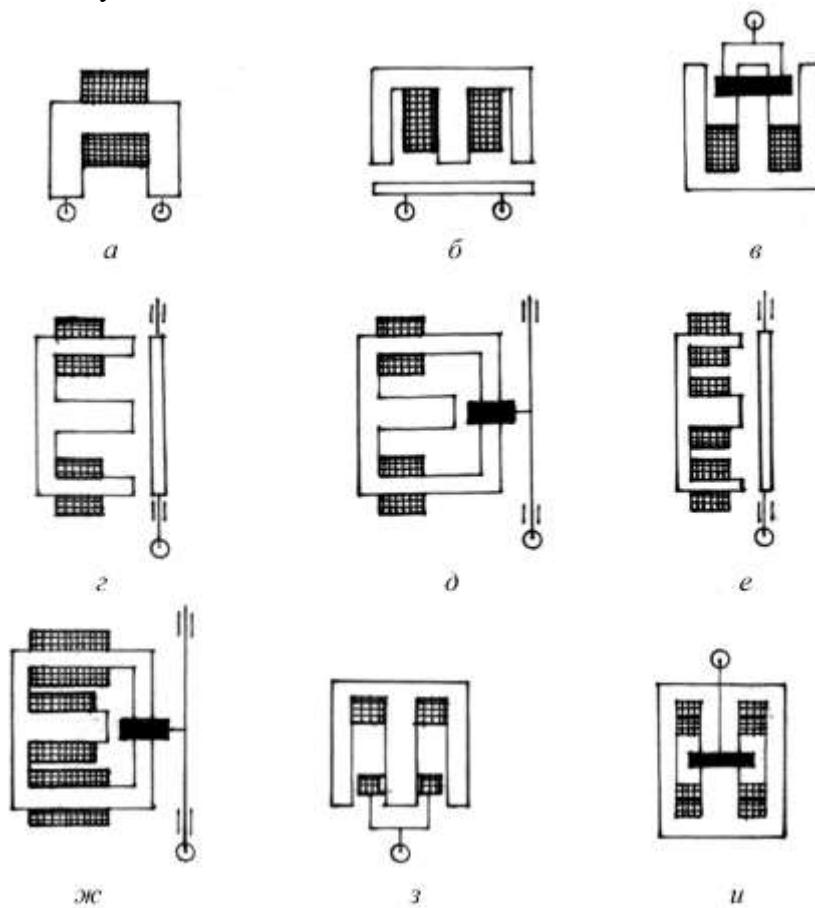


Рисунок 3. Основные типы электромеханических преобразователей для контроля толщины изоляции оправ: *а* — накладной индуктивный преобразователь (НИП); *б* — индуктивный преобразователь с подвижным сердечником (ИПС); *в* — индуктивный преобразователь с левитационным экраном (ИПЛЭ); *г* и *д* — дифференциальные индуктивные преобразователи с подвижными сердечником и экраном (ДИПС и ДИПЭ); *е* и *жс* — дифференциальные трансформаторные преобразователи с подвижными сердечником и экраном (ДТПС и ДТПЭ); *з* — трансформаторный преобразователь с подвижной обмоткой (ТПО); *и* — дифференциальный трансформаторный преобразователь с левитационным экраном (ДТПЛЭ).

В результате сопоставлений и оценки параметров этих преобразователей авторами данной работы выявлены их относительные преимущества и недостатки. Это позволило составить Таблицу, где даны сравнительный анализ характеристик различных электромеханических преобразователей. Относительные преимущества и недостатки их обозначены через цифры 1, 2 и 3, которые показывают места, приписываемые преобразователем по каждому рассматриваемому параметру. Например, масса подвижного элемента, выполненного в виде экрана наименьшая и обозначена числом 1, а масса подвижного сердечника обозначена числом 3. Наиболее чувствительными преобразователями являются преобразователи типа ДТПС, ДТПЭ, ДТПЛЭ и ТПО.

Таблица.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ТОЛЩИНЫ ИЗОЛЯЦИИ ОПРАВ

№	Тип преобразователя Параметры	НИП	ИПС	ИПЛЭ	ДИПС	ДИПЭ	ДТПС	ДТПЭ	ТПО	ДТПЛЭ
1	Чувствительность	3	2	2	2	1	2	1	1	1
2	Линейность	3	2	2	2	1	2	1	1	1
3	Остаточный сигнал	1	2	2	3	3	2	3	2	3
4	Чувствительность по нерабочим направлениям	1	2	3	1	3	1	3	2	3
5	Масса подвижного элемента	—	1	1	1	1	1	1	1	3
6	Реактивная сила	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Сложность производства	3	1	3	3	3	3	3	3	3
8	Сложность согласований преобразователя с оправой	3	1	3	3	3	3	3	3	3
9	Рабочий ход	1	3	1	3	1	3	1	1	1
10	Отношение диапазона перемещения к общей длине преобразователя	1	3	1	3	1	3	1	1	1
11	Допустимое влияние внешних условий на характеристики	3	2	1	2	1	2	1	2	1

На основании данных Таблицы можно сделать вывод, что преобразователи типа ИПЛЭ, ТПО и ДТПЛЭ применимы в тех случаях, когда требуется контролировать большие толщины изоляции. Одним из положительных качеств преобразователей с подвижными экранами типа ИПЛЭ, ДИПЭ, ДТПЭ и ДТПЛЭ являются слабые влияния на их характеристики внешних условий (магнитное и температурное поля, железные детали и т. д.). Отклонение выходного сигнала от нуля при нулевом входе наиболее меньше у преобразователей с подвижными экранами. Эти преобразователи нечувствительны к смещению подвижного элемента в поперечном направлении, и они просто согласуются с объектом.

Список литературы:

1. Абдуллаев Я. Р. Теория магнитных систем с электромагнитными экранами. М.: Наука, 2002, 288 с.
2. Абдуллаев Я. Р. Электромеханические преобразователи с использованием принципа индукционной подвески // Электротехника. 1979. №9. С. 19–22.
3. Хоффман Д. Техника измерений и обеспечение качества. Справочная книга, перевод с немецкого. М.: Энергоатомиздат, 1983, 472 с.
4. Измерения в промышленности: справочник / под ред. П. Парфоса, пер. с нем. М.: Металлургия, 1980, 648 с.
5. Walter L. Elektro-optical steel width determination “Measurement and Control”. 1994, October, pp. 381–383.
6. Kraus D. M. Noncontact Width gage measures strip steel. Automation, 1997, September.
7. Oswald R. Das Messen von Schicht und Blechdicken. Elektro-Anzeiger, 1998, 21, №6, s.100–103.

References:

1. Abdullaev Ya. R. Teoriya magnitnykh sistem s elektromagnitnymi ekranami. Moscow, Nauka, 2002, 288 p.
2. Abdullaev Ya. R. Elektromekhanicheskie preobrazovateli s ispol'zovaniem printsipa induktsionnoi podveski. Moscow, Elektrotehnika, 1979, no. 9, pp. 19–22.
3. Khofman D. Tekhnika izmerenii i obespechenie kachestva. Spravochnaya kniga, perevod s nemetskogo. Moscow, Energoatomizdat, 1983, 472 p.
4. Izmereniya v promyshlennosti. Spravochnik pod red. Parfosa P. Perevod s nemetskogo. Moscow, Metallurgiya, 1980, 648 p.
5. Walter L. Elektro-optical steel Width determination “Measurement and Control”. 1994, October, pp. 381–383.
6. Kraus D. M. Noncontact Width gage measures strip steel. Automation, 1997, September.
7. Oswald R. Das Messen von Schicht und Blechdicken. Elektro-Anzeiger, 1998, 21, no. 6, pp.100–103.

Работа поступила в редакцию
18.04.2016 г.

Принята к публикации
20.04.2016 г.