

УДК 621.4

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Ю.И. Стеблев, Н.А. Сизова, С.В. Сусарев, Р.К. Дусмухамбетов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются вопросы моделирования параметрических и трансформаторных преобразователей с П-образными магнитопроводами. Проведен анализ эффективности и оптимизации работы преобразователей при неразрушающем контроле сварных соединений. Исходя из условия оптимального режима работы вихретокового преобразователя было найдено аналитическое выражение для определения величины измерительного резистора источника напряжения питания токовой обмотки вихретокового преобразователя. Получены уравнения для выходных сигналов параметрического и трансформаторного преобразователей в функции магнитного сопротивления объекта контроля. Приведен алгоритм настройки трансформаторного преобразователя.

Ключевые слова: *вихретоковый преобразователь, сварной шов, магнитопровод, токовая обмотка, дефекты.*

Методы, основанные на использовании вихревых токов, широко используются для контроля листовых металлов и труб: выявления дефектов, неоднородностей структуры и отклонений от химического состава [1].

Физико-математический анализ работы различных конструктивных схем вихретоковых преобразователей (ВТП) показывает, что для дефектоскопии сварных соединений магнитных металлов наиболее перспективны преобразователи с П-образным магнитопроводом. Применение подобных ВТП позволяет реализовать различные алгоритмы сканирования сварного шва при выявлении продольных и поперечных трещин, отстроиться от мешающего воздействия геометрических параметров шва. Кроме того, указанный тип ВТП является наиболее универсальным устройством, позволяющим контролировать кольцевые сварные швы труб, сосудов, емкостей различного диаметра и плоских сварных конструкций. Подобная универсальность обеспечивается возможностью создания требуемой структуры электромагнитного поля в зоне контроля за счет изменения геометрии магнитной системы ВТП: размеров сечения полюсов, межполюсного расстояния и применения набора сменных полюсных наконечников, адаптированных под кривизну конкретной контролируемой детали.

ВТП с П-образным магнитопроводом может быть реализован как параметрический преобразователь с выходным сигналом в виде тока обмотки возбуждения (ОВ), а при наличии измерительной обмотки на одном из полюсов – как преобразователь трансформаторного типа.

Юрий Иванович Стеблев (д.т.н., проф.), профессор.

Сергей Васильевич Сусарев (к.т.н.), доцент.

Нина Алексеевна Сизова, старший преподаватель.

Ринат Кайрулович Дусмухамбетов, аспирант.

Эффективность работы трансформаторного ВТП с П-образным магнитопроводом существенно зависит от питания токовой обмотки. При анализе влияния режима питания на эффективность дефектоскопии сварного шва будем полагать, что измерительная обмотка работает в режиме, близком к режиму холостого хода, то есть входное сопротивление измерительной цепи достаточно велико (2–3 Мом) и не влияет на магнитное сопротивление системы «ВТП – объект контроля». Определим в этих условиях связь между выходным напряжением $U_{\text{вых}}$ преобразователя и магнитным сопротивлением контролируемого участка сварного шва, величина которого зависит от наличия или отсутствия дефектов: трещин, пор, непровара и т. п.

Уравнение обмотки возбуждения ВТП в комплексной форме имеет вид

$$\dot{U} = j2\pi f W \dot{\Phi} + jx_{\sigma} \dot{I} + RI + R_0 \dot{I}, \quad (1)$$

где \dot{U} – действующее комплексное напряжение питания ОБ;

f – частота;

W – число витков ОБ;

\dot{I} – комплексное действующее значение тока;

X_{σ} – реактивное сопротивление рассеяния ОБ;

$\dot{\Phi}$ – действующее комплексное значение основного магнитного потока;

R – сопротивление проводов ОБ;

R_0 – добавочное активное сопротивление, обеспечивающее требуемый режим работы ВТП;

$j2\pi f W \dot{\Phi}$ – напряжение, компенсирующее ЭДС самоиндукции ОБ.

В случае параметрического ВТП, содержащего только ОБ, величина R_0 представляет собой сопротивление датчика тока, формирующего выходной сигнал преобразователя.

Для трансформаторного ВТП, содержащего ОБ и измерительную обмотку, величина R_0 должна обеспечивать работу источника питания ОБ в режиме источника тока.

При установке ВТП на объект контроля (ОК), выполненный из ферромагнитного материала, потоки рассеяния малы и выполняются условия:

$$X_{\sigma} \cdot I \ll 2\pi f W \Phi; \quad RI \ll 2\pi f W \Phi.$$

При этом уравнение (1) имеет вид

$$\dot{U} = j2\pi f W \dot{\Phi} + R_0 \dot{I}. \quad (2)$$

В случае параметрического ВТП величина R_0 – сопротивление датчика тока, оно велико, поэтому $R_0 I \ll 2\pi f W \cdot \Phi$ $R_0 I \ll 2\pi f W \cdot$ и уравнение ОБ запишется так:

$$\dot{U} = j2\pi f W \dot{\Phi}. \quad (3)$$

Величину основного магнитного потока определим по закону Ома для магнитной цепи ВТП [2]:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I} \cdot W}{Z_M}, \quad (4)$$

где Z_M – комплексное магнитное сопротивление цепи ВТП, включающее магнитное сопротивление магнитопровода ВТП, контролируемого участка сварного шва и воздушного зазора между ВТП и ОК.

Определим ток ОБ – выходной сигнал параметрического ВТП с учетом всех составляющих электрического сопротивления этой обмотки: сопротивления проводов R , добавочного резистора R_0 и величины сопротивления, обусловленного рабочим магнитным потоком в системе «ВТП – объект контроля».

Последняя составляющая комплексного сопротивления ОБ – Z_k определяется в соответствии с теорией магнитных цепей следующим образом [2].

Определяем потокосцепление ОБ:

$$\dot{\Psi} = W\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}W^2}{Z_M} = \dot{L}I, \quad (5)$$

где \dot{L} – комплексная индуктивность ОБ с соответствующей магнитной цепью:

$$\dot{L} = \frac{\dot{\Psi}}{\dot{I}} = \frac{W^2}{Z_M}. \quad (6)$$

Комплексное сопротивление Z_k , обусловленное этой индуктивностью:

$$Z_k = j\omega\dot{L} = j\omega\frac{W^2}{Z_M}; \quad \omega = 2\pi f. \quad (7)$$

Таким образом, ток через обмотку возбуждения:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R_0 + R + j\omega\frac{W^2}{Z_M}} = \frac{\dot{U}Z_M}{(R_0 + R)Z_M + j\omega W^2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) определяет выходной сигнал параметрического ВТП. Используя при этом резистор R_0 как измерительный, можно реализовать не только амплитудную, но и амплитудно-фазовую обработку выходного сигнала параметрического ВТП.

Кроме того, из соотношения (3) следует, что при малых магнитных потоках рассеяния основной магнитный поток $\dot{\Phi}$ определяется величиной питающего напряжения U и не зависит от вариаций Z_M . Из уравнения (4) видно, что изменения Z_M , обусловленные наличием дефектов в ОК, компенсируются соответствующим изменением тока \dot{I} обмотки возбуждения.

Экспериментальные данные подтверждают этот теоретический вывод, то есть при входном напряжении $U = const$ и малых значениях R_0 , R и x_σ значение магнитного потока $\dot{\Phi}$ с достаточной точностью можно считать неизменным. При экспериментах на магнитопроводе параметрического ВТП размещалась измерительная обмотка, ЭДС которой измерялась электронным вольтметром с входным сопротивлением порядка 5 Мом. При стабилизированном напряжении питания ВТП в его магнитной цепи увеличивался воздушный зазор, что приводило к увеличению тока, но величина ЭДС, а следовательно, и магнитного потока оставалась неизменной при малых зазорах.

Так, при изменении зазора δ от 0,5 мм до 1,0 мм ток увеличился в 2,3 раза, полное электрическое сопротивление преобразователя уменьшилось с 138,76 до 60,33 Ом, а магнитное сопротивление цепи увеличилось в 2,3 раза соответственно на частоте $f = 50 \text{ Гц}$. Величина ЭДС при этом практически не изменилась. При увеличении зазора от 1,0 до 4,0 мм ток увеличился в 2,7 раза, а величина ЭДС при этом уменьшилась лишь на 2,7 %.

Выходное напряжение трансформаторного ВТП определим по известным формулам, пользуясь теорией магнитных цепей [2]:

$$U_{\text{вых}} = j2\pi f \Phi, \Phi = \frac{\dot{I}W}{Z_M}, \quad (9)$$

где Φ – комплексное действующее значение магнитного потока;

f – частота питающего напряжения;

W_u и W – числа витков измерительной и токовой обмоток;

\dot{I} – комплексный ток обмотки возбуждения;

Z_M – эквивалентное комплексное магнитное сопротивление цепи, включающее магнитные сопротивления: магнитопровода преобразователя, контролируемого участка сварного шва и воздушного зазора между ВТП и объектом контроля.

В реальных условиях обмотка возбуждения ВТП запитывается от стабилизированного источника напряжения U , а последовательно с этой обмоткой включается измерительный резистор R_0 для реализации амплитудно-фазовых измерений выходных сигналов преобразователя. Поэтому ток обмотки возбуждения определим с учетом всех составляющих электрического возбуждения Z_Σ этой обмотки, измерительного резистора R_0 и величины сопротивления, обусловленного рабочим магнитным потоком в системе «ВТП – объект контроля». Пренебрегая первой составляющей сопротивления Z_Σ по сравнению со второй и третьей и определяя третью составляющую электрического сопротивления через комплексное магнитное сопротивление Z_M [2], получим ток обмотки возбуждения:

$$I = \frac{U}{Z_\Sigma}; Z_\Sigma = R_0 + j2\pi f \frac{W^2}{Z_M}. \quad (10)$$

С учетом полученных соотношений выходное напряжение ВТП запишется так:

$$U_{\text{вых}} = j2\pi f W_u \Phi = j \frac{2\pi f W W_u U}{R_0 Z_M + j2\pi f W^2}, \quad (11)$$

где U – напряжение стабилизированного источника питания обмотки возбуждения.

Из формулы (11) следует, что при $R_0 \rightarrow 0$, то есть в случае, когда токовая обмотка ВТП запитывается от стабилизированного источника напряжения напрямую,

$$U_{\text{вых}} = \frac{W_u}{W} U; \quad (12)$$

при этом выходной сигнал ВТП не несет информации об объекте контроля, а формула (12) определяет неизвестную связь напряжений первичной и вторичной обмоток ненагруженного трансформатора.

В другом предельном случае $|R_0 Z_M| \gg 2\pi f W^2$ выражение (11) имеет вид

$$U_{\text{вых}} = j \frac{2\pi f W W_u U}{R_0 Z_M}. \quad (13)$$

При этом выходной сигнал ВТП определяется магнитным сопротивлением объекта контроля, то есть несет информацию о параметрах сварного шва. Генератор в этом случае работает в режиме источника тока.

Однако при больших R_0 резко уменьшается ток обмотки возбуждения, возрастает влияние шумов и помех. Поэтому режим питания обмотки ВТП необходимо выбрать исходя из минимально допустимой величины тока и достаточной чувствительности преобразователя к изменениям магнитного сопротивления Z_M при заданном соотношении сигнал/шум. Величина магнитного сопротивления Z_M системы «ВТП – объект контроля» определяется тремя составляющими:

$$Z_M = Z_{1M} + Z_{2M} + Z_{3M}, \quad (14)$$

где Z_{1M} – комплексное магнитное сопротивление объекта;

$$Z_{2M} = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S} \text{ – магнитное сопротивление воздушного зазора } \delta \text{ между}$$

ВТП и объектом;

Z_{3M} – магнитное сопротивление магнитопровода ВТП;

S – площадь поперечного сечения магнитопровода ВТП.

Как правило, магнитопровод ВТП выполняется из материала с высоким значением магнитной проницаемости (пермаллой, электротехническая сталь). Поэтому $|Z_{1M} + Z_{2M}| \gg |Z_{3M}|$, и соотношение (14) примет вид:

$$Z_M = \frac{2\delta}{\mu_0 S} + Z_{1M} = \frac{2\delta}{\mu_0 S} + R_{1M} + jX_{1M}, \quad (15)$$

где R_{1M} и X_{1M} – вещественная и мнимая составляющие магнитного сопротивления контролируемой среды. Активное магнитное сопротивление R_{1M} определяет реактивную мощность, а реактивное магнитное сопротивление X_{1M} – активную мощность – потери в среде [3].

В случае достаточно низких частот [4] $\frac{2\delta}{\mu_0 S} + R_{1M} \gg jX_{1M}$ уравнение (15) примет вид

$$Z_M = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S} + R_{1M} = R_M. \quad (16)$$

С учетом последнего соотношения действующее значение выходного напряжения ВТП запишем в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{2\pi f W W_u U}{\sqrt{(R_0 R_M)^2 + (2\pi f W^2)^2}}. \quad (17)$$

Чувствительность ВТП к изменениям магнитного сопротивления – дефектам сварного шва

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dR_M} = \frac{2\pi f W W_u R_0^2 R_M U}{[(R_0 \cdot R_M)^2 + (2\pi f W^2)^2]^{3/2}}. \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) следует, что функция $U_{\text{вых}}(R_M)$ – монотонно убывающая. Однако существует оптимальный режим питания ВТП, при котором чувствительность к изменениям R_M (дефектам) максимальна по модулю. Для определения этого режима рассмотрим функцию

$$F(R_M) = \left| \frac{dU_{\text{вых}}}{dR_M} \right| = \frac{2\pi f W W_u R_0^2 R_M U}{[(R_0 R_M)^2 + (2\pi f W^2)^2]^{3/2}}.$$

Исследуя эту функцию на экстремум, определим условие оптимального режима работы ВТП:

$$1 - \frac{3 \cdot (R_0 R_M)^2}{(R_0 R_M)^2 + (2\pi f W^2)^2} = 0. \quad (19)$$

Из соотношения (19) оптимальное значение R_0 :

$$R_0 = \frac{\sqrt{2\pi f W^2}}{R_M}. \quad (20)$$

Однако с учетом приближенного характера полученного соотношения (17), а следовательно, и уравнений (19) и (20) проведенную теоретическую оптимизацию режима работы трансформаторного ВТП можно считать лишь первым приближением – основой для дальнейшей экспериментальной настройки преобразователя.

Алгоритм такой настройки реализуется на реальном ВТП с ферромагнитным образцом из металла, идентичного ОК. Изменения магнитного сопротивления имитируются вариацией воздушного зазора между ВТП и контрольным образцом. Цель настройки – обеспечить питание ОБ преобразователя в режиме источника тока, причем ток такого источника должен быть максимально возможным при требуемой чувствительности ВТП к вариациям магнитного сопротивления материала ОК.

Рабочая частота преобразователя определяется по заданной толщине сварного шва в результате анализа распределения электромагнитного поля преобразователя в зоне контроля, а также частотных характеристик магнитного сопротивления среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. – М.: Машиностроение, 2006. – 368 с.
2. *Поливанов К.М.* Ферромагнетики. – М.: Госэнергоиздат, 1975. – 256 с.
3. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 263 с.
4. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 773 с.

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2016 г.

EDDY CURRENT PROBE OPERATION OPTIMIZATION FOR WELD SEAL CONTROL IN PIPELINE SYSTEMS

Y.I. Steblev, N.A. Sizova, S.V. Susarev. R.K. Dusmukhambetov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper reviews aspects corresponding to the simulation for parametric and transformer converter with U-shape core. Optimization performance analysis of converters for nondestructive weld seal testing was done. Due to eddy current probe optimal operation analytical form for detection of resistor value in power supply source of current winding in eddy current probe was found. Analytic expression for output signal of performance and transformer converter in monitor object's magnetic resistance were carried out. Transformer converter settings algorithm was presented.

Keywords: *eddy current probe, weld seal, core, current winding, kink.*

Yuri I. Steblev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Nina A. Sizova, Assistant.

Sergey V. Susarev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Rinat K. Dusmukhambetov, Postgraduate Student.