

УДК 538.4

ДВУХФАЗНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Ю. Б. ВОЛЫНСКИЙ, В. А. РАСКОЛЕНКО

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Рассматривается способ бесконтактного измерения электропроводности токопроводящих жидкостей, основанный на создании в контролируемой среде бегущего магнитного поля. Приводится электрическая схема двухфазного индуктора бегущего магнитного поля и даются выражения, позволяющие определить параметры эквивалентной схемы замещения и их связь с электропроводностью жидкости.

Иллюстраций 1, библиографий 4.

Если контролируемую среду поместить в бегущее магнитное поле, создаваемое двухфазным индуктором, то при этом в жидкости наводятся вихревые токи, вызывающие потери во вторичной системе индуктора. Так как величина потерь существенным образом зависит от электропроводности жидкости, то возникает возможность измерения контролируемого параметра путем измерения токов в обмотках индуктора или фазового сдвига между этими токами [1].

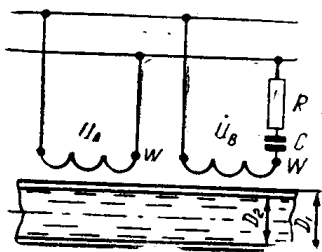


Рис. 1. Электрическая схема двухфазного измерителя электропроводности.

В простейшем случае устройство для бесконтактного измерения электропроводности может состоять из двухфазного индуктора (рис. 1), создающего бегущее магнитное поле в канале с контролируемой средой. Одна фаза индуктора подключается к источнику переменного напряжения непосредственно, а другая — через фазосдвигающую RC -цепочку. Электропроводность определяется по разности напряжений, приложенных к обмоткам индуктора.

Для случая, когда цилиндрический индуктор с внешним магнитопроводом создает бегущее магнитное поле в канале с внешним диаметром D_1 и внутренним диаметром D_2 , решение уравнений Максвелла [2] дает следующие результаты, позволяющие определить потери энергии как во всей вторичной системе, так и в слое жидкого металла:

$$\tilde{S} = jQ_0 \frac{\alpha [I_0 (\dot{\gamma} R_2) \dot{G} \cdot \dot{\gamma} + I_1 (\dot{\gamma} R_2) \dot{H} \cdot \dot{\xi}] \cdot I_0 (\alpha R_1)}{\xi [I_0 (\dot{\gamma} R_2) \dot{K} \cdot \dot{\gamma} + I_1 (\dot{\gamma} R_2) \dot{L} \cdot \dot{\xi}] \cdot I_1 (\alpha R_1)}, \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{\pi R_1 l \mu_0 \delta_m \omega I_1 (\alpha R_1)}{\alpha I_0 (\alpha R_1)}, \quad (2)$$

$$\tilde{S}_{II} = jQ_{0II} \frac{I_1(\gamma R_2) [\alpha \dot{K} I_0(\alpha R_2) + \dot{\xi} \dot{L} I_1(\alpha R_2)] / \gamma^2 I_0^*(\gamma R_2)}{I_1(\alpha R_2) [\gamma \dot{K} I_0(\gamma R_2) + \dot{\xi} \dot{L} I_1(\gamma R_2)] / \alpha^2 I_0(\alpha R_2)}, \quad (3)$$

$$Q_{0II} = \frac{\pi R_2 l \mu_0 \delta_m \omega \alpha I_0(\alpha R_2) |\dot{M}|^2}{|\alpha \dot{K} I_0(\alpha R_2) + \dot{\xi} \dot{L} I_1(\alpha R_2)|^2}, \quad (4)$$

где $\tilde{S}$ — комплексная мощность вторичной системы,

S_{II} — комплексная мощность слоя проводящей жидкости,

$\alpha = \frac{\pi}{\tau}$, τ — полюсное деление,

$$\xi^2 = \alpha^2 + j\mu_0 \omega \sigma_I, \quad (5)$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 + j\mu_0 \omega \sigma_{II}, \quad (6)$$

μ_0 — магнитная проницаемость;

σ_I — электропроводность стенок канала;

σ_{II} — электропроводность контролируемой жидкости;

f — частота, $\omega = 2\pi f$;

l — длина индуктора;

δ_m — линейная токовая нагрузка на внутренней поверхности индуктора;

I_0, I_1, K_0, K_1 — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода и нулевого и первого порядка второго рода.

$$\dot{G} = K_1(\xi R_2) \cdot I_1(\xi R_1) - I_1(\xi R_2) \cdot K_1(\xi R_1), \quad (7)$$

$$\dot{H} = K_0(\xi R_2) \cdot I_1(\xi R_1) + I_0(\xi R_2) \cdot K_1(\xi R_1), \quad (8)$$

$$\dot{K} = K_1(\xi R_2) \cdot I_0(\xi R_1) + I_1(\xi R_2) \cdot K_0(\xi R_1), \quad (9)$$

$$\dot{L} = K_0(\xi R_2) \cdot I_0(\xi R_1) - I_0(\xi R_2) \cdot K_0(\xi R_1), \quad (10)$$

$$\dot{M} = I_1(\xi R_2) \cdot K_0(\xi R_2) + K_1(\xi R_2) \cdot I_0(\xi R_2). \quad (11)$$

Из выражений (2) и (4) легко установить, что

$$X_{\Delta II} = \frac{\omega R_1 \mu_0 m W^2}{p} \cdot \frac{I_1(\alpha R_1)}{I_0(\alpha R_1)}, \quad (12)$$

$$X_{\Delta II} = \frac{\omega R_2 \mu_0 m W^2 \alpha^2 I_0(\alpha R_2) I_1(\alpha R_2) |\dot{M}|^2}{p |\alpha I_0(\alpha R_2) \dot{K} + \dot{\xi} I_1(\alpha R_2) \dot{L}|^2} \quad (13)$$

где X_{Δ} — реактивное сопротивление обмотки цилиндрического индуктора от магнитного поля в немагнитном зазоре при идеальном холостом ходе,

$X_{\Delta II}$ — реактивное сопротивление обмотки индуктора от магнитного поля в зоне с радиусом R_2 для случая, когда электропроводность контролируемой жидкости равна нулю;

m — число фаз,

W — число витков в фазе,

p — число полюсов.

Сопротивления, вносимые в первичную цепь индуктора за счет потерь во вторичной системе, могут быть учтены следующим образом:

$$\Delta Z = j X_{\Delta} (K_r - 1), \quad (14)$$

где K_r — коэффициент размагничивания [3].

Для нашего случая K_r определяется как отношение нормальных составляющих индукции на поверхности индуктора при наличии вторич-

ной системы и при идеальном холостом ходе и неизменной токовой нагрузке и равен

$$K_r = \frac{\alpha I_0 (\alpha R_1) [\dot{\gamma} I_0 (\dot{\gamma} R_2) \dot{G} + \xi I_1 (\dot{\gamma} R_2) \cdot \dot{H}]}{\xi I_1 (\alpha R_1) [\dot{\gamma} I_0 (\dot{\gamma} R_2) \dot{K} + \xi I_1 (\dot{\gamma} R_2) \cdot \dot{L}]} \quad (15)$$

Влияние потерь, обусловленных наличием в канале токопроводящей жидкости, может быть учтено следующим образом:

$$\Delta Z_{II} j X_{\Delta II} (\dot{K}_{rII} \cdot K_3^* - 1), \quad (16)$$

где ΔZ_{II} — вносимое в первичную цепь индуктора сопротивление;

K_{rII} — коэффициент размагничивания, обусловленный слоем токопроводящей жидкости;

K_3^* — коэффициент затухания, обусловленный слоем токопроводящей жидкости.

K_{rII} определяется отношением нормальных составляющих индукции на внутренней поверхности канала при наличии и отсутствии вторичной системы. Коэффициент затухания K_3 может быть определен как отношение тангенциальных составляющих индукции на внутренней поверхности канала при наличии и отсутствии вторичной системы и неизменной токовой нагрузке.

В рассматриваемом случае

$$K_{rII} = \frac{I_1 (\dot{\gamma} R_2) [\alpha I_0 (\alpha R_2) \cdot \dot{K} + \xi I_1 (\alpha R_2) \dot{L}]}{I_1 (\alpha R_2) [\dot{\gamma} I_0 (\dot{\gamma} R_2) \cdot \dot{K} + \xi I_1 (\dot{\gamma} R_2) \dot{L}]}, \quad (17)$$

$$K_3 = \frac{\dot{\gamma} I_0 (\dot{\gamma} R_2) \cdot [\alpha I_0 (\alpha R_2) \cdot \dot{K} + \xi I_1 (\alpha R_2) \cdot \dot{L}]}{\alpha I_0 (\alpha R_2) \cdot [\dot{\gamma} I_0 (\alpha R_2) \cdot \dot{K} + \xi I_1 (\dot{\gamma} R_2) \cdot \dot{L}]}, \quad (18)$$

Влияние стенок канала учитывается вносимым комплексным сопротивлением, которое определяется следующим образом:

$$\Delta Z_I = \Delta Z - \Delta Z_{II}. \quad (19)$$

Полное эквивалентное сопротивление фазы индуктора

$$Z_{\text{эКВ}} = r + \Delta r + j X_{\Delta} + j X_{\sigma} + j \Delta X = r_{\text{эКВ}} + j X_{\text{эКВ}}, \quad (20)$$

где r — сопротивление обмотки индуктора на постоянном токе;

X_{σ} — реактивное сопротивление рассеяния;

$\Delta r = -K_{rp} X_{\Delta}$ — вносимое активное сопротивление;

$\Delta X = X_{\Delta} (K_{ra} - 1)$ — вносимое реактивное сопротивление;

K_{ra} — действительная часть коэффициента размагничивания;

K_{rp} — мнимая часть коэффициента размагничивания.

Для обеспечения в канале с токопроводящей средой бегущего магнитного поля необходимо, чтобы для заданного значения электропроводности σ_{II0} выполнялись условия [4].

$$R = X_{\text{эКВ0}} - r_{\text{эКВ0}} = X_{\sigma} + K_{rpo} X_{\Delta} + K_{rao} X_{\Delta} - r, \quad (21)$$

$$C = \frac{1}{\omega (X_{\text{эКВ0}} + r_{\text{эКВ0}})} = \frac{1}{\omega (X_{\sigma} + X_{\Delta} K_{rao} + r - X_{\Delta} K_{rpo})}. \quad (22)$$

В общем случае для токов прямой и обратной последовательности в фазах А и В имеем:

$$I_{A1} = U \frac{Z_{\text{эКВ}} + R - \frac{j}{\omega C} - j Z_{\text{эКВ}}}{2 Z_{\text{эКВ}} \left(Z_{\text{эКВ}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}, \quad (23)$$

$$i_{A2} = U \frac{Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} + jZ_{\text{эKB}}}{2Z_{\text{эKB}} \left(Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}, \quad (24)$$

$$i_{B1} = U \frac{Z_{\text{эKB}} - \frac{1}{\omega C} - j(Z_{\text{эKB}} + R)}{2Z_{\text{эKB}} \left(Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}, \quad (25)$$

$$i_{B2} = U \frac{Z_{\text{эKB}} + \frac{1}{\omega C} + j(Z_{\text{эKB}} + R)}{2Z_{\text{эKB}} \left(Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}. \quad (26)$$

Падение напряжения на обмотке фазы В определяется для токов прямой и обратной последовательности

$$\dot{U}_{B1} = U_A \frac{Z_{\text{эKB}} - \frac{1}{\omega C} - j(Z_{\text{эKB}} + R)}{2 \left(Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}, \quad (27)$$

$$\dot{U}_{B2} = U_A \frac{Z_{\text{эKB}} + \frac{1}{\omega C} + j(Z_{\text{эKB}} + R)}{2 \left(Z_{\text{эKB}} + R - \frac{j}{\omega C} \right)}. \quad (28)$$

Разность между напряжениями U_A и $\dot{U}_B$ равна

$$\Delta \dot{U} = U_A - \dot{U}_{B1} - \dot{U}_{B2}. \quad (29)$$

Если токи обратной последовательности отсутствуют, что соответствует заданному значению электропроводности контролируемой среды, то $\dot{U}_B$ равно U_A . Анализ выражения (29) показывает, что линейная зависимость между ΔU и σ_{II} может иметь место при изменении электропроводности жидкости в достаточно широких пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Волынский. Способ бесконтактного определения электрической проводимости жидкости. Авторское свидетельство № 211645, Бюллетень № 8, 1968.
2. Э. Г. Кюльм, Х. И. Янес. Труды ТПИ. Таллин, Серия А, № 231, 1965, 3.
3. Н. М. Охременко. «Электричество», № 8, 1964, 18.
4. Ю. С. Чечет. Электрические микромашины автоматических устройств. М., «Энергия», 1964.