

УДК 621.317.39.084.2

В.В. РУДАКОВ, А.А. КОРОБКО**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ДИЭЛЬКОМЕТРИИ ЭМУЛЬСИИ ТИПА ВОДА – НЕПОЛЯРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК**

У статті розглянуті наступні фактори, які впливають на систематичну похибку вимірювання вмісту вологи емульсії діелькометричним методом в резонансному режимі: відносний температурний коефіцієнт діелектричної проникності трансформаторного масла; залежність величини об'ємного вмісту вологи від температури емульсії; зміна геометричних розмірів і, відповідно, зміна величини ємності вимірювального перетворювача від температури; вплив барометричного тиску повітря на діелектричну проникність; вплив вмісту розчиненого повітря в емульсії. Проведено аналіз та розрахунки для чисельного визначення величини істотних факторів, які суттєво впливають на систематичну похибку при вимірюванні вмісту вологи. Дано рекомендації для зменшення впливу несуттєвих факторів.

Ключові слова: систематична похибка, діелектрична проникність, температурний коефіцієнт, лінійний коефіцієнт температурного розширення, барометричний тиск, повітря, трансформаторне масло.

В статье рассмотрены следующие факторы, влияющие на систематическую погрешность измерения влагосодержания эмульсии диэлектрическим методом в резонансном режиме: относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости трансформаторного масла; зависимость величины объемного влагосодержания от температуры эмульсии; изменение геометрических размеров и, соответственно, изменение величины емкости измерительного преобразователя от температуры; влияние барометрического давления воздуха на диэлектрическую проницаемость; влияние содержания растворенного воздуха в эмульсии. Проведен анализ и расчеты для численного определения величины существенных факторов, оказывающих значительное влияние на систематическую погрешность при измерении влагосодержания. Даны рекомендации для уменьшения влияния несущественных факторов.

Ключевые слова: систематическая погрешность, диэлектрическая проницаемость, температурный коэффициент, линейный коэффициент температурного расширения, барометрическое давление, воздух, трансформаторное масло.

The article discusses the following factors affecting the systematic error moisture content measurement: the relative temperature coefficient of dielectric permittivity of transformer oil, the dependence of the volumetric water content of the emulsion temperature, changing the geometric dimensions and accordingly the change in the capacitance of the transmitter on the temperature, the effect of barometric pressure on the dielectric constant, the effect of air dissolution process in emulsion. It was determined that significant impacts on the systematic errors are: relative temperature coefficient of dielectric permittivity of transformer oil, the dependence of the volumetric water content of the emulsion temperature. The systematic errors introduced by the barometric pressure are less than the desired technical precision determination of moisture content. To reduce the influence of dissolved air an evacuation of transformer oil and emulsions is offered.

Keywords: bias, dielectric constant and temperature coefficient of linear thermal expansion coefficient, barometric pressure, air and transformer oil.

Введение. Как указано ранее [1,2], реализация резонансного метода диэлектрической емкостной элементом которого является заполненный исследуемой эмульсией измерительный преобразователь (ИП). При этом диэлектрическая проницаемость и, как следствие, влагосодержание в смеси определяется частотой генерации измерительного генератора (ИГ). Следовательно, изменение диэлектрической проницаемости эмульсии, изменение линейных размеров измерительного преобразователя и изменение объемного влагосодержания, обусловленное влиянием температуры, барометрического давления воздуха и растворенного воздуха в исследуемой жидкости, в момент измерения подлежит учету.

Цель работы. Численное определение и учет влияния на точность измерения влагосодержания различных как температурных факторов (температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, зависимость величины объемного влагосодержания от

температуры, линейный коэффициент температурного расширения материалов), а также нетемпературных факторов, обусловленных влиянием барометрического давления воздуха и количеством растворенного воздуха в неполярном диэлектрике на примере трансформаторного масла.

Жидкостные температурные коэффициенты.

Теоретически относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости жидкости равный

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{d\epsilon_r}{dT}$$

можно определить, воспользовавшись уравнением Клаузиуса-Моссотти через величины относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и коэффициента объемного расширения β в следующем виде [3,4]:

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{d\epsilon_r}{dT} = -\beta \frac{(\epsilon_r - 1)(\epsilon_r + 2)}{3\epsilon_r}$$

Например, для трансформаторного масла ($\epsilon_r \approx 2,3$, $\beta_m = 7,0 \cdot 10^{-4}$) [3] теоретически рассчитанная

величина $\alpha_\varepsilon = -3,9 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Данное теоретическое значение α_ε близко к величинам α_ε , рассчитанным для трансформаторного масла (типичного неполярного диэлектрика), произведенного из различного исходного сырья по данным [5], которые приведены в табл. 1. Поэтому для оценочных расчетов можно использовать практически полученные характеристики трансформаторных масел.

Таблица 1 – Влияние исходного сырья на электрические характеристики трансформаторных масел

Нефть	tg δ , 10^{-2} при		ε_r при		ρ при 20°C	Отн. темп. коэф. ε_r , $10^{-4}/^\circ\text{C}$
	20°C	70°C	20°C	70°C		
Сураханская отборная	0,11	1,0	2,18	2,13	0,867	4,64
Балаханская масляная	0,07	0,8	2,21	2,15	0,879	5,41
Смесь балаханской масляной и романтинской	0,08	0,7	2,22	2,16	0,885	5,38
Бузовнинская	0,08	0,8	2,23	2,17	0,887	5,36
Бибиэйбатская легкая	0,09	0,85	2,25	2,18	0,893	6,32
Сиазанская	0,10	0,9	2,28	2,22	0,931	5,33

Вторым температурным фактором, который влияет на точность определения влагосодержания, является зависимость самой величины объемного влагосодержания от температуры $W(T^\circ)$. Эта зависимость обусловлена тем фактором, что по определению величина объемного влагосодержания равна отношению объемов эмульгированной воды к объему всей эмульсии, а вода и эмульсия имеют разные коэффициенты объемного расширения (β_v и β_ω соответственно).

При этом объемы воды V_v и эмульсии V_ω , в функции температуры изменяются по разному из-за различия коэффициентов объемного расширения воды β_v и масла β_m :

$$W(T^\circ) = \frac{V_v(T^\circ)}{V_\omega(T^\circ)} = \frac{V_v(T^\circ)}{V_m(T^\circ) + V_v(T^\circ)},$$

где V_m – объем чистого масла.

При $V_v \ll V_m$

$$W(T^\circ) \approx \frac{V_v(T^\circ)}{V_m(T^\circ)} = \frac{V_v(1 + \beta_v \Delta T^\circ)}{V_m(1 + \beta_m \Delta T^\circ)}.$$

Если принять величину V_v/V_m за начальное влагосодержание эмульсии, то величина $(1 + \beta_v \Delta T^\circ)/(1 + \beta_m \Delta T^\circ)$ определяет во сколько раз изменится влагосодержание эмульсии при изменении температуры на величину ΔT° .

Расчеты показывают, что при $\beta_v \approx 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ (при 20°C) и при усредненной величине $\beta_m \approx 5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ изменение влагосодержания $(1 + \beta_v \Delta T^\circ)/(1 + \beta_m \Delta T^\circ)$ составляет величину 0,9996 при $\Delta T^\circ = 1^\circ\text{C}$ и величину 0,996 при $\Delta T^\circ = 10^\circ\text{C}$.

То есть физическое изменение влагосодержания

эмульсии, обусловленное разными величинами коэффициентов объемного расширения воды и масла составляет величины $4 \cdot 10^{-4}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ для изменений температуры на 1°C и 10°C , соответственно.

Коэффициент линейного расширения. Следующим температурным фактором, который определяет точность измерения влагосодержания является изменение геометрических размеров ИП и, как следствие, изменение величины емкости ИП под действием температуры.

Для ИП, исследуемых в данной работе и используемых в качестве основного материала электродов нержавеющую сталь и латунь, величины коэффициентов линейного расширения α_l соответственно составляют $17,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и $18,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ [6].

Если предположить, что рабочая емкость ИП прямо пропорциональна ε_r и длине l ИП (которая измеряется при воздействии температуры), то суммарный температурный коэффициент изменения емкости α_c будет определяться как $\alpha_c = \alpha_\varepsilon + \alpha$.

Зависимость относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r(T^\circ)$ от температуры T° можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_r(T^\circ) = \varepsilon_r(1 + \alpha_c \cdot \Delta T^\circ).$$

Принимая во внимание, что частота генерации ИГ $F_{ИГ}$ обратно пропорциональна $\sqrt{\varepsilon_r}$, частоту генерации ИГ в функции изменения температуры можно представить в следующем виде:

$$F_{ИГ}(T^\circ) = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r(1 + \alpha_c \cdot \Delta T^\circ)}};$$

где C – константа ИГ.

Так как $\alpha_c \Delta T^\circ \ll 1$, то $F_{ИГ}(T^\circ)$ можно преобразовать к следующему виду:

$$F_{ИГ}(T^\circ) = F_{ИГ0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_c \Delta T^\circ}} \approx F_{ИГ0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}},$$

где $F_{ИГ0} = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}}$ – частота генерации ИГ при начальной

температуре; $\frac{1}{1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}}$ – относительное измерение

частоты ИГ при изменении температуры эмульсии и ИП на величину $\Delta T^\circ = 1^\circ\text{C}$.

При $\alpha_l = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $\alpha_\varepsilon = -4 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ относительное изменение частоты $\left(1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}\right)^{-1}$ составляет величину 1,00019, а абсолютный уход частоты $\Delta F_{ИГТ}$ равен $19,0 \cdot 10^{-5} F_{ИГ0}$.

В [1] для нулевых значений «слепой» емкости ИП и емкости ИГ было получено следующее выражение для величины влагосодержания W :

$$W = \frac{2(F_{ИГМ} - F_{ИГСМ})}{3F_{ИГСМ}},$$

где $F_{ИГМ}$ и $F_{ИГСМ}$ – частоты генерации ИГ при заполнении его маслом и эмульсией.

Используя данное выражение, можно определить какую погрешность определения влагосодержания ΔW привносит изменение температуры на 1°C , приравняв

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{\alpha_\epsilon \Delta T^\circ}{2}} \cong \frac{F_{ИГМ} - F_{ИГСМ}}{F_{ИГСМ}}$$

При этом $\Delta W = \frac{2}{3} \cdot 19 \cdot 10^{-5} = 1,26 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
($1,26 \cdot 10^{-2}\%$ объемного содержания воды).

Барометрическое давление. Барометрическое давление воздуха влияет на диэлектрическую проницаемость ϵ_r из-за эффекта сжимаемости масла и воды и определяет процесс диффузии (растворения) воздуха в исследуемой эмульсии.

Так как масло и вода являются практически несжимаемыми жидкостями (например, для воды коэффициент адиабатической сжимаемости при 20°C имеет величину $4,55 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ [4]), то данным эффектом можно пренебречь, так как при измерении атмосферного давления на величину 10^4 Н/м^2 относительное изменение объема воды и соответственно диэлектрической проницаемости составит величину около $4,55 \cdot 10^{-8}$. Данная систематическая погрешность существенно меньше требуемой технической точности определения влагосодержания $\pm 5\%$.

Растворенный воздух. Совершенно по иному на систематическую погрешность оказывает влияние процесс растворения воздуха в эмульсии. На рис.1 представлена зависимость объемного содержания воздуха в трансформаторном масле от атмосферного давления [7, 8].

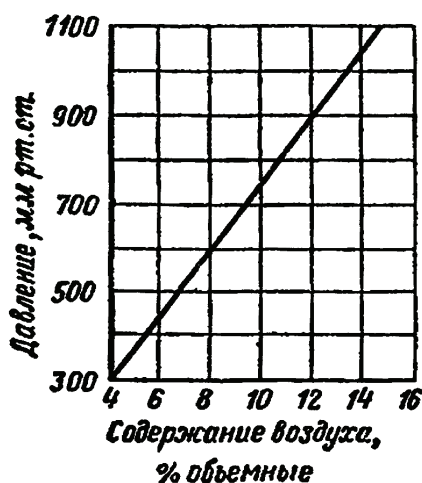


Рисунок 1 – Растворимость воздуха в трансформаторном масле при различных атмосферных давлениях.

Так 10% объемного содержания воздуха при атмосферном давлении соответствует изменению массы одного кубического метра трансформаторного масла на величину 0,129 кг [5]. Учитывая, что плотность чистого трансформаторного масла составляет около $0,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, то относительное изменение плотности трансформаторного масла, обусловленное влиянием

растворенного воздуха, может составить максимальную величину

$$1 - \frac{0,87 \cdot 10^3 - 0,129}{0,87 \cdot 10^3} = 1,48 \cdot 10^{-4}$$

Такое относительное изменение плотности вызывает соответствующее изменение ϵ_r , соизмеримое с влиянием температуры, что требует учета фактора насыщения исследуемой эмульсии воздухом.

Выводы. Анализ полученных численных результатов влияния температурных (относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, зависимость величины объемного влагосодержания от температуры и изменение геометрических размеров измерительного преобразователя под действием температуры) и нетемпературных факторов (барометрическое давление воздуха и влияние растворенного воздуха) позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение температуры даже на 10°C приводит к систематической ошибке измерений влагосодержания обусловленной разными величинами коэффициентов объемного расширения воды и масла на 0,6%, что существенно меньше требуемой точности технических измерений влагосодержания.

2. Изменение температуры на 1°C вызывает систематическую погрешность определения влагосодержания, обусловленную остальными температурными факторами равную по величине $1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$ ($1,26 \cdot 10^{-2}\%$ объемного содержания воды).

3. Для обеспечения достоверности измерения влагосодержания данным методом в диапазоне до $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$ ($1 \cdot 10^{-2}\%$ объемного содержания воды) необходимо в процессе проведения измерений обеспечивать одинаковую температуру масла и эмульсии с точностью не хуже $\pm 0,05^\circ\text{C}$. При этом величина систематической погрешности измерения влагосодержания, обусловленной влиянием температуры, не превышает величины $\pm 5\%$.

4. Систематическая погрешность измерения влагосодержания, обусловленная влиянием барометрического давления существенно меньше требуемой технической точности определения влагосодержания $\pm 5\%$.

5. Влияние растворенного воздуха вносит существенную погрешность соизмеримую с величиной систематической погрешности вносимой температурой. Для ее уменьшения целесообразно производить предварительное вакуумирование масла и исследуемой эмульсии до заливки их в ИП, а также обеспечить минимизацию времени их контакта с воздухом.

Список литературы

1. Рудаков В. В. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлектрическим методом в резонансном режиме / В. В. Рудаков, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50 (1092). – С. 143-149.
2. Рудаков В. В. Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора / В. В. Рудаков, А.А. Коробко // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 5. – С. 51-56. – doi:20998/2-74-

272X.2016.5.08

3. Интернет: http://studopedia.ru/6_124926_temperatur-niy-koefitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html

4. *Липштейн Р. А.* Трансформаторное масло. – 3-е изд., перераб. и доп. / *Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович* & – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

5. Интернет: <http://forca.ru/knigi/arhiv/obrabotka-transformatornogo-masla-3/html>

6. Интернет: <http://leg.co.ua/transformatori/teoriya/otno-sitelnaya-dielektricheskaya-pronitsatmost-transformatornyh-masel.html>

7. Физическая энциклопедия / Гл. ред. *А. М. Прохоров*. Ред. Кол. *Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов* и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. – 704 с.

8. Интернет: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials>.

References (transliterated)

1. Rudakov V. V. Korobko A.A. Increasing the sensitivity of the moisture content measurements in transformer oil dielectric method in resonant mode. *Visnyk NTU «KhPI»*. Bulletin of NTU «KhPI», 2014, no. 50 (1092), pp. 143-149. (Rus).

2. Rudakov V. V. Korobko A.A. Vvisokochuvstvitelnyiy SVCh izmeritel vlagosoderzhaniya v nepolyarnyih daelektricheskikh zhidkostyah na osnove stupenchatogo neodnorodnogo koaksialnogo rezonatora. *Elektrotehnika i elektromehnika*, 2016, no.5, pp. 51-56. (rus). doi:20998/2-74-272X.2016.5.08

3. Интернет: http://studopedia.ru/6_124926_temperatur-niy-koefitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html

4. *Lipshteyn R. A., Shahnovich M. I.* Transformatornoe maslo. 3 izd., pererab. i dop. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 p.

5. Интернет: <http://forca.ru/knigi/arhiv/obrabotka-transformatornogo-masla-3/html>

6. Интернет: <http://leg.co.ua/transformatori/teoriya/otno-sitelnaya-dielektricheskaya-pronitsatmost-transformatornyh-masel.html>

7. *Fizicheskaya entsiklopediya / Gl. red. A. M. Prohorov*. Red. Kol. *D. M. Alekseev, A. M. Baldin, A. M. Bonch-Bruevich, A. S. Borovik-Romanov* i dr. Moscow: Sov. Entsiklopediya, 1988, 704 p.

8. Интернет: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials>.

Поступила (received) 24.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив температури і барометричного тиску на метрологічні характеристики резонансного методу діелькометрії емульсії типу вода - неполярний діелектрик / В. В. Рудаков, О. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Влияние температуры и барометрического давления на метрологические характеристики резонансного метода диелькометрии эмульсионного типа вода – неполярный диелектрик/ В. В. Рудаков, А. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Effect of temperature and barometric pressure in the metrological characteristics of the resonance method dielkometrii water emulsion type - non-polar dielectric / V. V. Rudakov, A. A. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рудаков Валерій Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інженерної електрофізики, Національний технічний університет «ХПІ».

Рудаков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Инженерной электрофизики Национальный технический университет «ХПИ».

Rudakov Valery Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Engineering Electrophysics National Technical University "KhPI".

Коробко Олександр Анатолійович – аспірант кафедри Інженерної електрофізики, Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

Коробко Александр Анатольевич – аспірант кафедри Інженерної електрофізики, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

Korobko Aleksandr Anatolevych – Graduate Student of the Department of Engineering Electrophysics, National Technical University "KhPI", phone: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com.