

УДК 621.317.332

*В. П. Маланин, А. М. Чивокин*

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ «ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК – ВОДОНЕФТЯНАЯ ЭМУЛЬСИЯ»

**А н н о т а ц и я.** По экспериментально снятым амплитудно-частотным характеристикам импеданса двухполюсника системы «емкостный датчик – нефть» аппроксимируется логарифмическая амплитудно-частотная характеристика импеданса двухполюсника. По виду логарифмической амплитудно-частотной характеристики и значениям параметров точек перегиба синтезируется эквивалентная схема замещения системы «емкостный датчик – нефть».

**A b s t r a c t.** By experimental values of system «capacitive sensor – oil» is approximated the logarithmic amplitude-frequency characteristic of an impedance of the two-terminal network. By the form the logarithmic amplitude-frequency characteristic and values of parameters of points of bend the equivalent circuit of system «by capacitor the sensing transducer – oil» is synthesised.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** амплитудно-частотные характеристики, импеданс, двухполюсник, система «емкостный датчик – нефть», эквивалентная схема.

**K e y w o r d s:** amplitude-frequency characteristics, impedance, two-terminal network system «by capacitor the sensing transducer – oil», equivalent circuit.

Важнейшими характеристиками качества товарной нефти и нефтепродуктов являются влажность и показатель содержания солей. Качество товарной нефти ставится в зависимость от влажности нефти и ее солесодержания по двум причинам: во-первых, наличие солей и влаги интенсифицирует процесс коррозии трубопроводов, насосов и аппаратуры для обработки нефти; во-вторых, соли и влага являются балластом, напрасно транспортируемым по нефтепроводу.

В настоящее время измерение солесодержания нефти производят в основном двумя методами: методом определения содержания хлористых солей титрованием водного экстракта и методом неводного потенциометрического титрования хлористых солей. Использование данных методов имеет такие серьезные недостатки, как довольно длительный процесс измерения солесодержания, сложность, а в некоторых случаях и невозможность автоматизации процесса определения солесодержания в нефти и нефтепродуктах.

Значительно ускорить процесс измерения влажности и солесодержания нефти и повысить точность измерения позволяет применение автоматических измерительных приборов на базе электрометрических методов с использованием воздействия на контролируемый материал (нефть или водонефтяная эмульсия), размещенный в специальном датчике, переменным электромагнитным полем в диапазоне частот  $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^7$  Гц [1, 2]. В работах [3, 4] рассматриваются методы и устройства с использованием емкостных датчиков для измерения и контроля самых различных показателей качества веществ, материалов и сред по значениям, найденным в результате анализа системы «емкостный датчик – анализируемая среда» информативных параметров, характеризующих поведение системы при воздействии электромагнитного поля и однозначно связанных с изменяющимися показателями качества анализируемых веществ, материалов и сред. Так, например, в работе [4] для контроля и измерения солесодержания нефти предлагается использовать названный авторами частотно-дизелькометрический метод, основанный на том, что частота, определяющая максимум потерь в дисперсной фазе,

может служить мерой для определения ее проводимости, а следовательно, и солесодержания в соответствии с выражением

$$\gamma = 10^3 \cdot \frac{\omega_m \epsilon_0 (\epsilon_b - \epsilon_n)}{\lambda} \frac{D - W}{1 - W} = K_\gamma f_m,$$

где  $\omega_m$  – частота, соответствующая максимуму  $\epsilon''$  и являющаяся мнимой частью диэлектрической проницаемости, определяющей потери;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon_n$ ,  $\epsilon_b$  – диэлектрические проницаемости дисперсной среды (нефти) и дисперсной фазы (воды) соответственно;  $W$  – объемное содержание дисперсной фазы (влажность нефти);  $K_\gamma$  – коэффициент пропорциональности между солесодержанием  $\gamma$  и частотой  $f_m$ , на которой наблюдается максимум тангенса угла диэлектрических потерь системы «емкостный датчик – анализируемая среда»;  $\lambda$  – эквивалентная электропроводность соли;

$$D = \frac{\epsilon_b + 2\epsilon_n}{\epsilon_b - \epsilon_n}.$$

Процесс измерения солесодержания нефти с использованием этого метода заключается в нахождении частоты при воздействии на систему «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия» электромагнитного поля, на которой наблюдается максимум тангенса угла диэлектрических потерь системы. При этом точность измерения солесодержания нефти в большей степени определяется достаточно широким диапазоном изменения частоты воздействия, зависящим от измеряемых концентраций солесодержания в нефти, и организацией процесса нахождения в широком частотном диапазоне экстремума тангенса угла диэлектрических потерь системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия».

Зная, что тангенс угла диэлектрических потерь есть отношение реальной составляющей иммитанса, например проводимости двухполюсной цепи емкостного датчика, к мнимой составляющей:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Re}[Y(j\omega)]}{\operatorname{Im}[Y(j\omega)]},$$

модель системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия» можно представить в виде двухполюсной эквивалентной схемы замещения, содержащей два элемента: емкость  $C$ , характеризующую мнимую составляющую иммитанса, и сопротивление  $R$ , характеризующее реальную составляющую иммитанса. Однако такое двухэлементное представление модели системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия» было бы некорректным, так как тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  для такой двухэлементной схемы замещения есть не имеющая экстремумов по оси частот монотонная функция вида

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC}.$$

Для нахождения адекватной модели системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия» будем использовать в качестве критерия подобия наличие максимума (экстремума) тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  системы, для чего необходимо усложнить схему замещения системы и представить модель системы в виде трехэлементной схемы замещения, тангенс угла диэлектрических потерь для которой, как будет показано ниже, имеет на частотной оси экстремум.

Для получения адекватной модели системы с практической точки зрения широко применяются экспериментальные методы, позволяющие находить модели объектов по результатам измерения их входных и выходных величин [5]. Как правило, уровень априорных сведений должен быть достаточным лишь для выбора структуры модели и условий проведения эксперимента. Построение моделей объектов на основе такого подхода обычно называют идентификацией, под которой мы будем понимать определение структуры и параметров мо-

дели системы, обеспечивающих наилучшую близость выходных величин модели и объекта в смысле заданного критерия при совпадающих входных воздействиях.

Среди активных методов идентификации широкое распространение получили частотные методы, основанные на измерении установившихся выходных сигналов исследуемого объекта, вызванных гармоническим входным воздействием. Результатом решения задачи идентификации является модель, представленная в частотной области. При этом полученная модель должна быть адекватна объекту в частотной области.

На рис. 1 приведен вид экспериментально снятых амплитудно- и фазочастотных характеристик проводимости  $Y(\omega)$  системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия». Реальная амплитудно-частотная характеристика иммитанса двухполюсного объекта с минимально-фазовыми характеристиками  $A(\omega)$  может быть аппроксимирована логарифмической кусочно-линейной функцией  $L(\omega)$  с наклонами  $0 \div 20$  дБ/дек, или  $0 \div -20$  дБ/дек. Первая точка излома функции  $L(\omega)$  определяется двумя координатами и, следовательно, двумя параметрами объекта, а остальные точки характеризуются одной координатой, т.е. одним параметром.

Рассмотрим построение модели двухполюсного объекта, для которого на рис. 1 приведены экспериментально снятые частотные характеристики амплитуды  $A(\omega)$  и фазы  $\varphi(\omega)$  комплексной проводимости объекта  $Y(\omega)$  в логарифмическом масштабе.

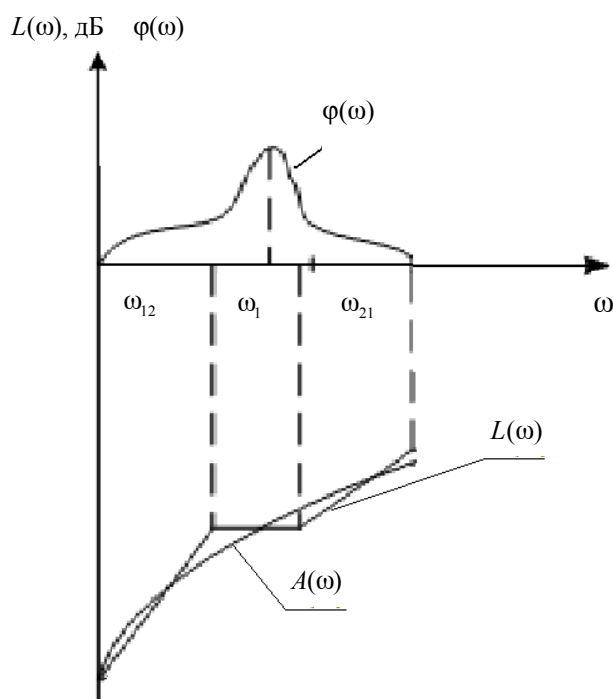


Рис. 1. Экспериментально снятые фазочастотная  $\beta(\omega)$  и амплитудно-частотная характеристики проводимости  $Y(\omega)$ -объекта

По виду аппроксимированной логарифмической амплитудно-частотной характеристики  $L(\omega)$  иммитанс (сопротивление или проводимость) двухполюсного объекта можно представить по аналогии с функциями передачи в теории автоматического управления в операторном виде:

$$W(\omega) = \frac{K_0 p (T_{11} p + 1)}{T_{12} p + 1}.$$

Этому выражению соответствуют две двухполюсные модели объекта в виде двух дуальных трехэлементных эквивалентных схем замещения, одна из которых представляет параллельное соединение емкости  $C_0$  с последовательным соединением емкости  $C_1$  и сопротивления  $R_1$  (показана на рис. 2):

$$Y(\omega) = \frac{K_0 p(T_{11}p + 1)}{T_{12}p + 1},$$

где  $K_0 = C_0$ ,  $T_{11} = R_1 C_1$ ,  $T_{12} = R_1(C_0 + C_1)$ .

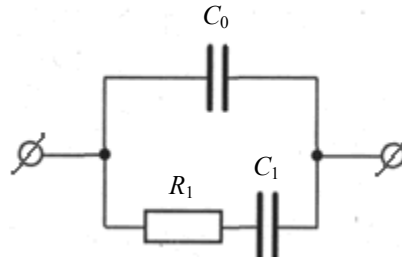


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия»

Необходимым условием реализации таких моделей является выполнение неравенства  $T_{12} > T_{11}$ , которое сохраняется, как видно из выражений для  $T_{11}$  и  $T_{12}$ , при любых соотношениях элементов  $C_0$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ . Это позволяет однозначно определить  $T_{11}$  и  $T_{12}$ , а также в общем

случае найти частоту  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{T_{11}T_{12}}}$ , на которой наблюдается максимальное значение фазового

сдвига между напряжением, приложенным к двухполюснику, и током, протекающим через этот двухполюсник. Учитывая, что функция  $\operatorname{tg} \delta$  – монотонно возрастающая от значения угла  $\delta$ , в качестве информативного параметра при измерении солесодержания может быть принята частота, при которой наблюдается измеряемое максимальное значение угла  $\delta$  (аргумента комплексного иммитанса системы), что позволит упростить процесс измерения солесодержания нефти, так как отпадает необходимость измерения  $\operatorname{tg} \delta$  как отношения действительной и мнимой частей комплексного иммитанса.

Для данной схемы замещения можно определить действительную  $\operatorname{Re}$  и мнимую  $\operatorname{Im}$  части ее комплексной проводимости  $Y(j\omega)$ :

$$\operatorname{Re}[Y(j\omega)] = \frac{1}{R_1} \frac{\omega^2 R_1^2 C_1^2}{1 + \omega^2 R_1^2 C_0^2},$$

$$\operatorname{Im}[Y(j\omega)] = \omega C_0 + \frac{\omega C_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_0^2}.$$

Зная, что тангенс угла диэлектрических потерь определяется выражением

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Re}[Y(j\omega)]}{\operatorname{Im}[Y(j\omega)]},$$

и исследуя это выражение на экстремум как функцию от изменяющейся частоты, нетрудно получить следующее: частота, на которой наблюдается максимум потерь в дисперсионной фазе, для приведенной трехэлементной схемы замещения определяется выражением

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}.$$

Как было показано выше, частота  $f_m$ , на которой наблюдается максимум потерь в дисперсионной фазе, пропорциональна солесодержанию нефти  $\gamma$ . Тогда можно записать

$$\gamma = K_m \frac{1}{R_1 C_1} \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}},$$

где  $K_m$  – коэффициент пропорциональности.

В этом выражении информативным параметром, пропорционально зависящим от соле- содержания, является электропроводность дисперсной фазы (воды)  $Y_1 = 1/R_1$ , а параметры  $C_1$  и  $C_2$  определяются геометрическими размерами емкостного датчика, диэлектрическими свой- ствами водонефтяной эмульсии и от соле- содержания не зависят. Таким образом, измеряя в полученной трехэлементной схеме замещения системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия» информативный параметр – проводимость  $Y_1 = 1/R_1$ , можно определить соле- содержание нефти из выражения

$$\gamma = KY_1,$$

где  $K = \text{const}$  для известных геометрических размеров емкостного датчика и диэлектрических характеристик дисперсных фаз водонефтяной эмульсии.

Одним из аспектов решения задачи измерения содержания нефти является разра- ботка методов и средств измерения параметров электрических цепей, представленных в виде трехэлементных двухполюсников [6]. Важная задача получения информации о параметрах – осуществление раздельного, независимого, инвариантного измерения каждого из них. В част- ных случаях, особенно при измерении неэлектрических величин с помощью параметрических датчиков, достаточно обеспечить независимость измерения только одного или некоторых ин- формативных параметров схем замещения датчиков, представляемых в виде трехэлементных двухполюсников.

### Список литературы

1. Берлинер, М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности / М. А. Берлинер. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – 488 с.
2. Кричевский, Е. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е. С. Кричев- ский [и др.] ; под ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
3. Бугров, А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля каче- ства / А. В. Бугров. – М. : Машиностроение, 1982. – 94 с.
4. Бенин, С. Д. Частотно-диэлькометрический метод определения содержания в нефти и нефтепродуктах / С. Д. Бенин, И. Ю. Кругман, К. С. Романько, И. Л. Соколов // Измерительная техника. – 1974. – № 8. – С. 70–72.
5. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 681 с.
6. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

---

#### **Маланин Владимир Павлович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: ait@pnzgu.ru

#### **Malanin Vladimir Pavlovich**

candidate of technical sciences,  
associate professor,  
sub-department of automation and telemechanics,  
Penza State University

#### **Чивокин Алексей Михайлович**

магистрант, кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: ait@pnzgu.ru

#### **Chivokin Aleksey Mikhailovich**

postgraduate student,  
sub-department of automation and telemechanics,  
Penza State University

---

УДК 621.317.332

#### **Маланин, В. П.**

**Анализ и синтез эквивалентных схем замещения системы «емкостный датчик – водонефтяная эмульсия»** / В. П. Маланин, А. М. Чивокин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 15–19.