

УДК 615.471

ТЕХНОЛОГИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ В БИОСУБСТРАТАХ

В. А. Аушева,

аспирант

З. М. Юлдашев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Предложена технология и автоматизированный комплекс для исследования ионного состава биосубстратов организма. В основе технологии лежит разработанная теория проводимости композитного электролита в поле переменного тока. Рассматриваемый комплекс может стать универсальным методом медицинской диагностики.

Введение

Современный уровень развития медицинских технологий в области терапевтической техники диктует соответствующие требования к методам и средствам медицинской диагностики. Особенно большой интерес представляют методы исследования ионного состава биожидкостей (биосубстратов), так как все патологические изменения в организме прежде всего отражаются в процессах клеточного обмена, что влечет за собой изменение ионного состава жидкостей, посредством которых осуществляется обмен веществ.

В настоящее время можно выделить ряд средств диагностики, применяемых в подавляющем числе случаев: это спектрофотометрические анализаторы, используемые в рутинной лабораторной практике, а также ионоселективные анализаторы электролитов, применяемые для экспресс-анализа содержания основных электролитов биожидкостей.

Однако, несмотря на высокие достижения в области медицинской диагностики, применяемые анализаторы способны определять лишь содержание определенных видов ионов в электролитах. Универсального же автоматизированного комплекса, способного проанализировать электролит любого состава, не существует.

Как известно, концентрация ионов в жидких электролитах напрямую связана с электропроводностью, что позволяет определять концентрацию ионов в бинарных растворах заданного состава. Если же речь идет о композитных электролитах с неизвестным заранее составом, определить вклад в проводимость различных видов ионов, присутствующих в жидкости, до настоящего времени не

представлялось возможным. Не существует ни инструментальных средств, ни технологий, позволяющих производить подобный анализ.

Материалы и метод

Отсутствие технологии определения ионного состава по электропроводности связано с необходимостью разработать, прежде всего, теорию проводимости композитного электролита.

Авторами предложена и экспериментально подтверждена данная теория. В ее основе лежит математическая модель проводимости электролита в поле переменного тока. Согласно произведенным расчетам в результате рассмотрения сил, действующих на электролит в поле переменного тока, данная модель выглядит следующим образом.

Основное уравнение разработанной модели описывает зависимость скорости движения ионов $V(t)$ от частоты (ω) поля, изменяющегося по гармоническому закону, воздействующего на электролит:

$$V(t) = \frac{qU_m}{L} \times \left[\frac{\omega m \sin(\omega t) + 6\pi\eta r \left(\cos(\omega t) - \exp\left[-\frac{6\pi\eta r}{m}t\right] \right)}{(\omega m)^2 + (6\pi\eta r)^2} \right],$$

где U_m — амплитуда переменного напряжения, воздействующего на ион; L — расстояние между электродами; η — вязкость жидкости; q — заряд иона; m — его масса; r — его эффективный радиус.

Адекватность модели нашла математическое подтверждение:

— при $\omega = 0$ процесс будет осуществляться в постоянном электрическом поле, в этом случае уравнение полностью согласуется с законом Стокса:

$$V = \frac{qU_m}{6\pi\eta rL} \Leftrightarrow V = \frac{f}{6\pi\eta r};$$

— при $\omega \rightarrow \infty$ ионы не в состоянии отслеживать изменение направления электрического поля, поэтому скорость их движения будет минимальной:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} [V(\omega)] = 0.$$

Все виды ионов вносят определенный вклад в процесс электропроводности, поэтому для каждого из них можно записать отдельное выражение, связывающее частоту поля с величиной удельной электропроводности, обусловленной движением ионов данного вида (частной электропроводности). Как показывает разработанная теория проводимости жидких электролитов в поле переменного тока, выражение записывается следующим образом:

$$g_i(j\omega) = \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{N_a^2 m_i} \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + a_i^2}} e^{-j\text{arctg} \frac{\omega}{a_i}} = A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)};$$

$$A_i(\omega) = \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{N_a^2 m_i} \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + a_i^2}}; \quad \varphi_i(\omega) = -\text{arctg} \frac{\omega}{a_i},$$

где $A_i(\omega)$, $\varphi_i(\omega)$ — амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики вклада в удельную электропроводность i -го вида ионов соответственно.

Полученное выражение для АЧХ частной электропроводности можно преобразовать следующим образом:

$$A_i(\omega) = \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{N_a^2 m_i} \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + a_i^2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow A_i(\omega) = \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{6\pi N_a^2 \eta r_i} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/a_i)^2}}.$$

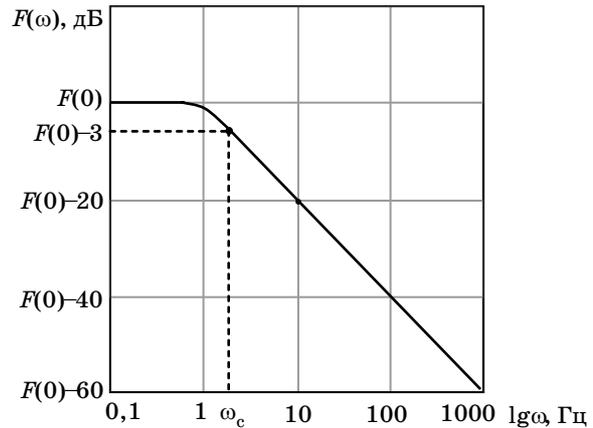
Данное выражение полностью соответствует АЧХ фильтра Баттерворта первого порядка:

$$A_B(\omega) = \frac{A_{B0}}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^2}},$$

где ω_c — частота среза АЧХ; A_{B0} — амплитудное значение на нулевой частоте.

Это означает, что для определения характеристик АЧХ частной электропроводности можно воспользоваться методикой оценки характеристик, принятой для фильтров.

Для этого, прежде всего, нужно перейти к логарифмической АЧХ (ЛАЧХ). При этом по оси аб-



■ Рис. 1. Вид ЛАЧХ фильтра Баттерворта первого порядка

сцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе, а по оси ординат — амплитуда в децибелах: $F(\omega) = 20 \lg A(\omega)$. Для фильтров первого порядка ЛАЧХ выглядит следующим образом (рис. 1).

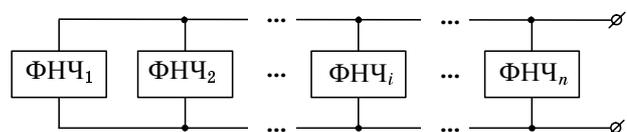
Как и АЧХ фильтра Баттерворта первого порядка, АЧХ частной электропроводности имеет довольно пологий спад, поэтому в качестве частоты спада наиболее целесообразно использовать частоту, при которой амплитуда составляет 0,707 от максимальной, т. е. $F(0) - 3$ дБ (в данном случае речь идет о фильтре нижних частот (ФНЧ)).

Таким образом, каждая АЧХ частной электропроводности всех видов ионов, участвующих в процессе проводимости, может быть представлена в электронной модели как АЧХ фильтра нижних частот.

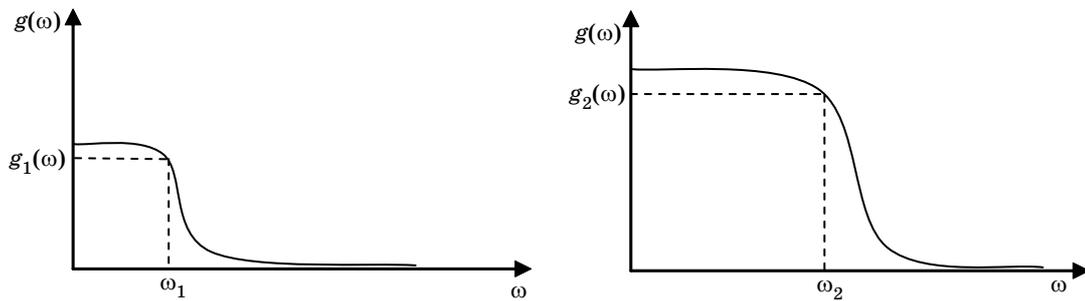
Поскольку проводимость — величина аддитивная, электрическая модель проводимости поликомпонентного электролита в целом представляет собой совокупность параллельно соединенных ФНЧ, каждый из которых является моделью частной электропроводности данного вида ионов (рис. 2).

Математический анализ модели показывает, что для каждого вида ионов существует строго определенная частота среза АЧХ, вычисляемая следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} g_i(\omega_{ci}) &= \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{N_a^2 m_i^2} \frac{1}{\sqrt{\omega_{ci}^2 + a_i^2}} \\ g_i(0) &= \frac{F^2 z_i^2 n_{0i}}{N_a^2 m_i} \frac{1}{a_i} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{r_i}{m_i} = \frac{\omega_{ci}}{6\pi\eta}.$$



■ Рис. 2. Электрическая модель проводимости поликомпонентного электролита



■ Рис. 3. Графики спада проводимостей компонентов бинарного электролита

Данные частоты не могут повторяться у различных видов ионов, так как величины m_i и r_i строго присущи определенному виду ионов, а изменение радиуса иона в n раз не означает пропорционального изменения его массы в n раз.

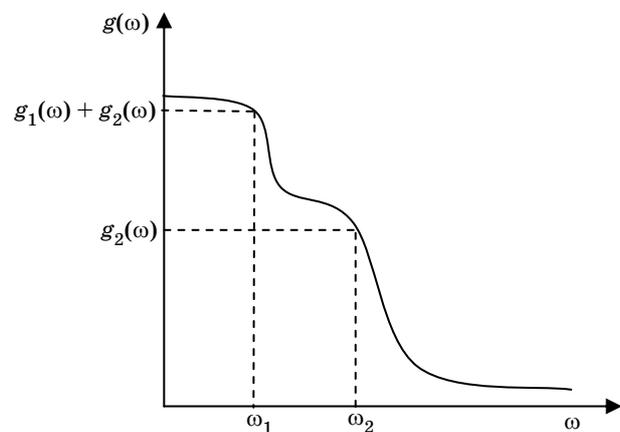
Рассмотрим простейший случай композитного электролита — бинарный раствор. В этом случае электрическая модель представляет собой два параллельно соединенных фильтра, имеющих различные частоты спада (рис. 3).

При пропускании через данный раствор переменного тока постепенно увеличивающейся частоты можно получить следующую АЧХ (рис. 4).

Следуя данным правилам, в виде электрической модели можно представить поликомпонентный электролит (рис. 5).

Получив данный график, его необходимо разбить на ряд характеристических участков, соответствующих каждому отдельному фильтру. После определения высоты каждой ступени находится разница между ними, значение которой и есть величина частной электропроводности данного фильтра:

$$g_i(j\omega) = g_{ki}(j\omega) - g_{k(i+1)}(j\omega) = \sum_{l=i}^n g_l(j\omega) - \sum_{l=i+1}^n g_l(j\omega). \quad (1)$$



■ Рис. 4. График спада проводимости бинарного электролита

На данном этапе:

1) нахождение набора частот спада позволяет определить качественный состав электролита:

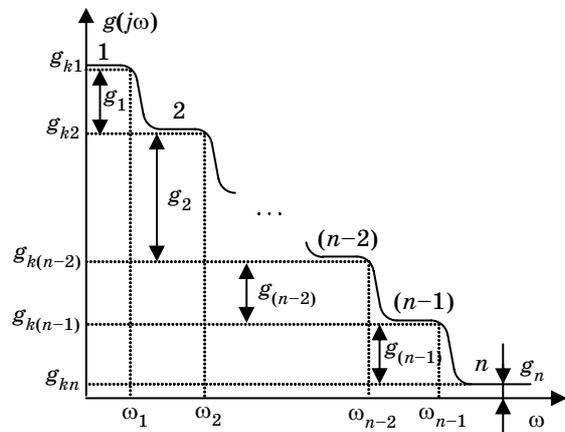
$$\omega_1 = \frac{6\pi\eta r_1}{m_1}, \quad \omega_2 = \frac{6\pi\eta r_2}{m_2}, \quad \dots, \quad \omega_i = \frac{6\pi\eta r_i}{m_i}, \quad \dots, \quad \omega_n = \frac{6\pi\eta r_n}{m_n}; \quad (2)$$

2) нахождение набора частных электропроводностей позволяет определить концентрацию каждого вида ионов, входящих в состав электролита (количественный состав):

$$\left. \begin{matrix} g_i(0) \\ z_i \\ m_i \\ z_i \end{matrix} \right\} \Rightarrow n_{oi} = \sqrt{\frac{g_i(0)}{F^2 \frac{z_i^2}{6\pi\eta N_a^2 m_i r_i}}}. \quad (3)$$

В соответствии с вышеизложенным предлагается технология оценки концентрации ионов поликомпонентного электролита, включающая следующие этапы:

1) получение характеристики зависимости удельной электропроводности от частоты воздействующего поля (см. рис. 5);



■ Рис. 5. График спада проводимости поликомпонентного электролита

2) вычисление частных проводимостей для компонентов биожидкости (1);

3) вычисление концентрации компонентов электролита по известным проводимостям (3).

Эта технология описывается ранее предложенным алгоритмом [1].

Таким образом, с помощью электрической модели проводимости электролита можно производить структурный анализ его состава, разработав анализатор, регистрирующий частоты спада АЧХ для параллельно соединенных фильтров.

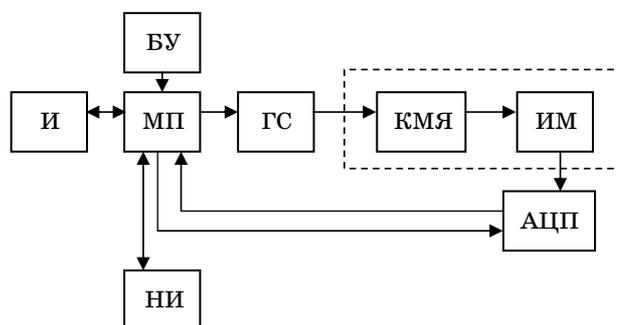
Результаты

Данный анализатор вместе с программным обеспечением, основанным на приведенных математических расчетах, является автоматизированным комплексом определения ионного состава жидких электролитов (в частности, биожидкостей организма) (рис. 6).

Микропроцессор выступает в качестве ядра системы, которое обеспечивает управление частотой гармонического сигнала, формируемого генератором сигналов. Частота сигнала плавно изменяется в диапазоне от 0 до 100 МГц.

Этот сигнал подается на электроды микрокондуктометрической ячейки (требования по объему, габаритам), а затем с помощью измерительного модуля обеспечивается измерение падения напряжения на ячейке. Далее сигнал подвергается аналого-цифровому преобразованию и вводится в микропроцессор для вычисления проводимостей и концентраций ионов согласно формулам (1)–(3). Результаты измерения выводятся на индикатор.

Для обеспечения высокой точности измерения концентрации необходимо учитывать влияние комплекса факторов как методического, так и инструментального характера и осуществлять корректировку вычислений с учетом влияния всех факторов [2].



■ Рис. 6. Структурная схема автоматизированного комплекса для исследования ионного состава: БУ — блок управления, И — индикатор, НИ — накопитель информации, МП — микропроцессор, ГС — генератор гармонического сигнала, КМЯ — кондуктометрическая ячейка, ИМ — измерительный модуль, АЦП — 14–16-разрядный аналого-цифровой преобразователь

Поэтому до проведения измерений с помощью данной системы осуществляется измерение концентрации эталонных одно- и поликомпонентных электролитов с последующим расчетом оценки погрешностей. Полученные значения погрешностей учитываются при реальных измерениях. Для этого результаты юстировки сохраняются в накопителе информации.

Выводы

В ходе проведенной работы авторами детально разработана и экспериментально проверена принципиально новая технология исследования ионного состава биожидкостей организма. Главное достоинство описанной технологии — ее универсальность. Предложенный автоматизированный комплекс, основанный на данной технологии, позволяет определять состав любых жидких электролитов.

Литература

1. Юлдашев З. М., Мухаметшина В. А. Автоматизированная система для анализа ионного состава биосубстратов // Информационно-управляющие системы. 2006. № 1. С. 33–39.

2. Аушева В. А. Анализ источников погрешностей оценки концентрации ионов в композитных электролитах // Тр. 62-й науч.-техн. конф., посвященной Дню радио. 2007. С. 216–218.