

**Кокорин В.В.
Чарыков Н.А.
ИГУПИТ (Москва)**

Моделирование работы четырехэлектродного автономного электростимулятора в жидких средах.

В последнее время значительное распространение получили различные автономные электростимуляторы (АЭС) организма человека и животных [1, 2]. АЭС, представляющие собой портативные электронные устройства, хорошо зарекомендовали себя как лечебное средство для стимуляции желудочно-кишечного тракта пациентов, а также в качестве устройства, облегчающего ход ряда специфических заболеваний внутренних органов. Разработанная четырехэлектродный АЭС оказывает более сильное лечебное воздействие и характеризуется отсутствием ряда негативных явлений, имеющих место при работе обычного электростимулятора. В настоящем исследовании не рассматриваются медицинские аспекты работы четырехэлектродного АЭС. Объектом изучения являлись особенности взаимодействия электронного устройства управления стимулятором и его электродной системы, находящейся в жидкой среде внутри организма пациента. Конструкция рассматриваемого прибора, более разветвленная по сравнению с обычными стимуляторами, и сложный характер выходного электрического воздействия делают АЭС4 интересным научным объектом. Изучение работы данного устройства в жидкой среде позволяет проверить правильность методики моделирования электрических свойств электродных систем АЭС.

Конструкция рассматриваемого устройства включает в себя четыре электрода **E1, E2, E3, E4** из нержавеющей стали. Электроды прикреплены к диэлектрическому корпусу “С” так, как это показано на рис.1. Внутри корпуса размещаются источник питания и электронное устройство управления (ЭУУ).

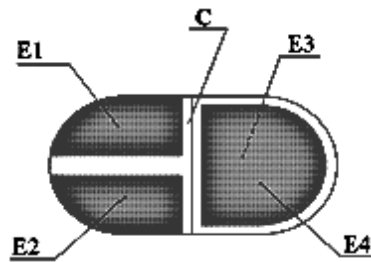


Рис.1. Конструкция АЭС.

При работе стимулятора импульсы выходного электрического тока должны протекать попеременно от одного электрода прибора к другому. При этом должны иметь место все возможные комбинации пар электродов и все возможные направления протекания тока. Для реализации такого алгоритма работы АЭС внутри ЭУУ помещены четыре выходных каскада управления (ВКУ), соединяемые с соответствующими электродами прибора. Электрические схемы ВКУ представлены на рис.2.

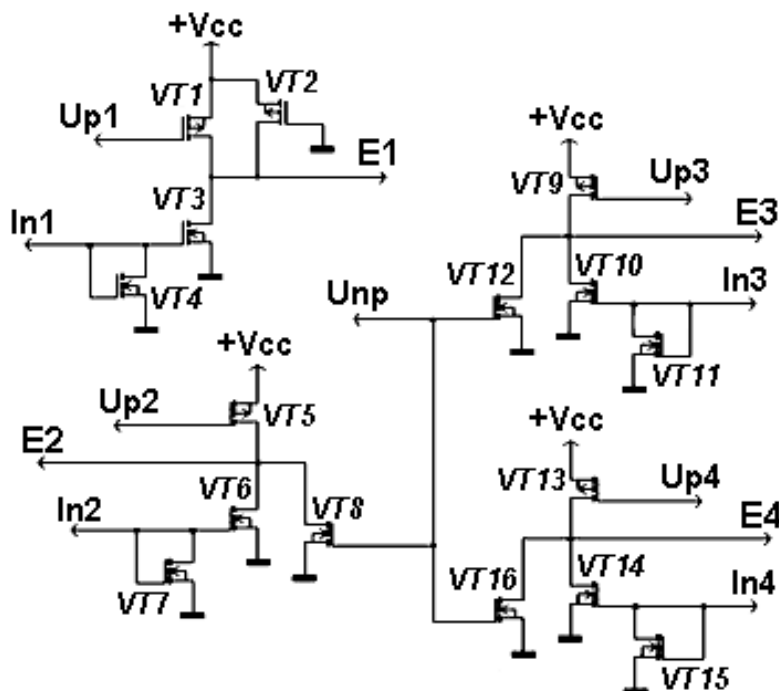


Рис.2. Выходные каскады ИМС управления четырехэлектродным АЭС.

Управление электродами АЭС осуществляется мощными МОП транзисторами $VT3$, $VT6$, $VT10$, $VT14$, $VT1$, $VT5$, $VT9$, $VT13$. Остальные транзисторы выполняют вспомогательные функции.

Во включенном состоянии мощные выходные n-канальные транзисторы ($VT3$, $VT6$, $VT10$, $VT14$, рис.2) функционируют в качестве генераторов выходного тока АЭС, а p-канальные транзисторы ($VT1$, $VT5$, $VT9$, $VT13$) представляют собой низкоомные ключевые элементы. Выходные вольтамперные характеристики этих компонентов ЭУУ в открытом состоянии приведены на рис.3.

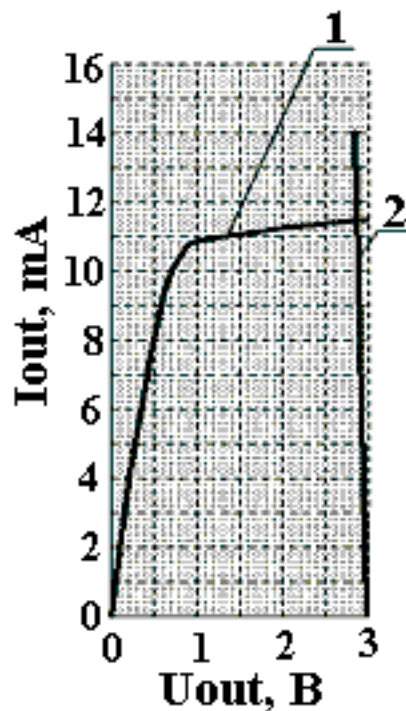


Рис.3. ВАХ выходного n-канального генератора тока (1) и выходного p-канального ключа (2).

Выходное воздействие электростимулятора формируется в виде пачек из 16 импульсных интервалов. Пачки импульсов следуют каждые 3,125 секунды. Таким образом, весь период воздействия может быть разделен на две части: активная часть (16 импульсных интервалов) и пассивная часть (пауза между пачками импульсов). Временные диаграммы сигналов управления выходными МОП транзисторами ЭУУ представлены на рис.4. Мощные выходные транзисторы открываются поочередно в течение активной части периода, а средние транзисторы ($VT8$, $VT12$, $VT16$, рис.2) находятся в открытом состоянии во время паузы. Таким образом, электроды АЭС: E2, E3, E4 соединяются с отрицательным выводом источника питания в течение всей пассивной части периода выходного воздействия. Микро мощный p-канальный МОП транзистор

$VT2$ открыт постоянно, т.к. его затвор жестко соединен с общей точкой (см. рис.2).

В течение активного периода воздействия каждый импульсный интервал состоит из трех участков: «А», «В» и «С» (см. рис.4), - различающихся состоянием выходных транзисторов ЭУУ.

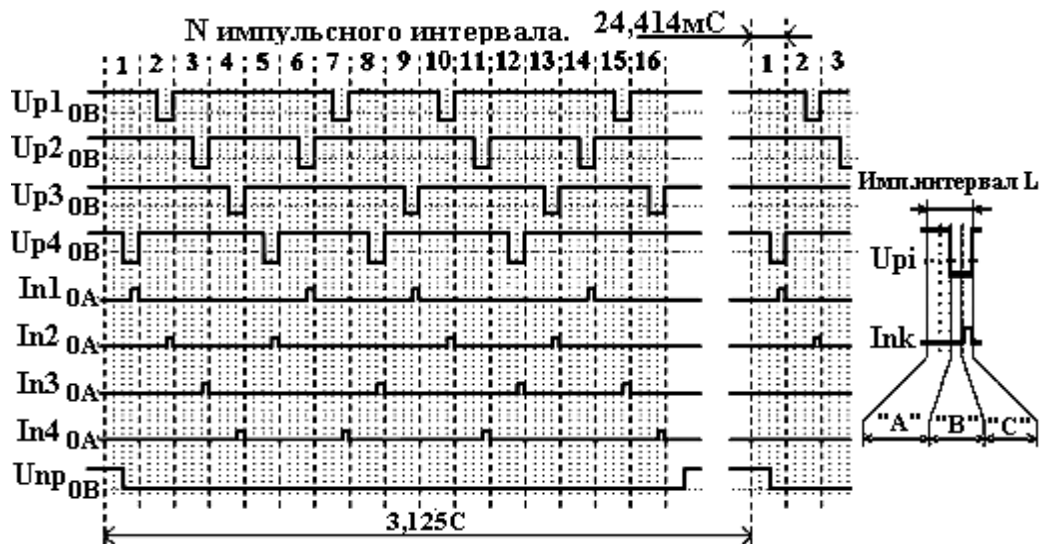


Рис.4. Временные диаграммы сигналов управления выходными транзисторами ЭУУ.

В течение участка «А» все выходы устройства управления находятся в высокоимпедансном состоянии; открытым при этом является только микромощный транзистор $VT2$. Исключением является первый импульсный интервал, в котором участок «А» отсутствует, т.к. в течение этого промежутка времени открыты средние n-МОП транзисторы $VT8$, $VT12$, $VT16$. В начале участка «В» открывается один из мощных выходных p-МОП ключей ($VT1$, $VT5$, $VT9$, $VT13$), который соединяет электрод E_i с положительной клеммой источника питания $+V_{cc}$. Этот ключ остается в замкнутом состоянии в течение участка «С» так же, как и на участке «В». В промежутке времени участка «С» включается один из выходных n-канальных генераторов тока, чем и обеспечивается протекание тока из электрода E_i в электрод E_k .

Изучение работы четырехэлектродного АЭС в жидких средах проводилось с помощью макета электродной системы (МЭС). МЭС изготавливался следующим образом: в пустом корпусе АЭС просверливались четыре отверстия, через которые пропускались провода МГТФ 0,5; провода

припаивались изнутри корпуса к электродам АЭС; вся конструкция склеивалась и герметизировалась. Противоположные концы проводов соединялись с соответствующими выходами ЭУУ. МЭС помещался в исследовательскую жидкость и осциллограммы напряжений на его электродах фиксировались с помощью запоминающего осциллографа С8-17.

На рис.5 приведены осциллограммы выходных напряжений АЭС4, снятые при погружении МЭС в кислый желудочный сок человека. Осциллограммы фиксировались при общей точке осциллографа, соединенной с положительной клеммой источника питания.

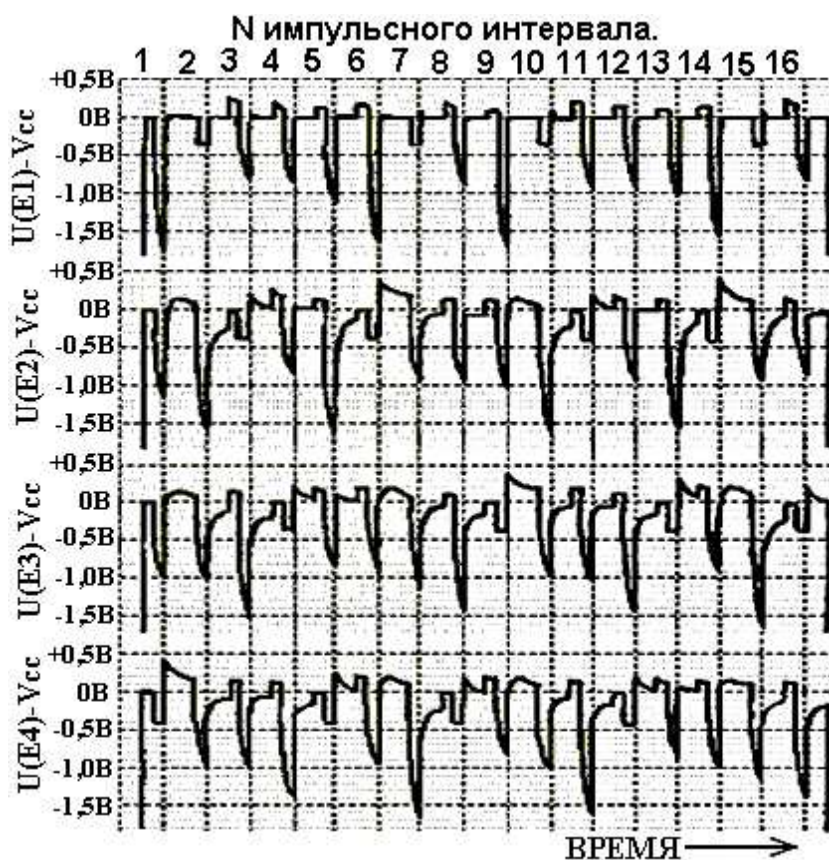


Рис.5. Осциллограммы выходных напряжений АЭС.

Кривые зависимостей $U(E_k) = F(t)$ имеют очень сложную форму. Они доступны для простой интерпретации только на некоторых своих участках. Так потенциал электрода E1 равен $+V_{cc}$ в течение участков «А» всех (кроме первого) импульсных интервалов. Это связано с тем, что в этом периоде времени открыт только микромощный выходной транзистор VT2, соединяющий E1 с положительной клеммой источника питания. При этом электрический ток

через систему отсутствует и падение напряжения между истоком и стоком транзистора $VT2$ равно нулю.

Потенциал электрода E_k практически равен $+V_{cc}$ на участке «В» в том случае, если в течение этого промежутка времени открыт соответствующий мощный выходной р-МОП ключ. Это имеет место, например, на участке «В» 6-го импульсного интервала для выходного напряжения $U(E2)$.

Далее на участке «С» потенциал электрода, соединенного с открытым р-МОП ключом остается практически постоянным и отличается от $+V_{cc}$ на величину dU . Значение dU равно падению напряжения между истоком и стоком открытого р-МОП ключа, вызываемому протеканием выходного тока I_{out} . Ток этот изменяется в течение участка «С» незначительно, т.к. величина его задается выходным генератором тока на мощном п-МОП транзисторе (см. кривую 1 на рис.3). Для участка «С» 6-го импульсного интервала: п-МОП генератор тока - транзистор $VT3$ (электрод $E1$); р-МОП ключ - транзистор $VT5$ (электрод $E2$).

Очевидно, что «провалы» потенциала на участке «С» на осциллограммах всех выходных напряжений связаны с протеканием выходного тока АЭС. Однако простой интерпретации не поддается плавное изменение потенциала электродов в течение этих интервалов времени. Непонятным является также наличие выбросов напряжения выше уровня $+V_{cc}$ (положительная клемма источника питания) или ниже уровня общей точки (отрицательная клемма источника питания). Последнее имеет место на электроде $E4$ в начале паузы. Полная интерпретация формы кривых $U(E_k) = F(t)$ становится возможной только после разработки адекватной электрической эквивалентной схемы АЭС. Схему эту следует использовать для электрического моделирования работы прибора в жидких средах.

При моделировании работы АЭС4 в жидкой среде электронное устройство управления достаточно представить в виде соответствующих моделей выходных каскадов (см. схемы на рис.2). При этом МОП транзисторы замещаются эквивалентными схемами, применяемыми в программе PSpice [5].

Исключением являются мощные выходные р-МОП ключи ($VT1$, $VT5$, $VT9$, $VT13$), которые при проведении расчетов представлялись в виде ключевых элементов с сопротивлением в открытом состоянии $R_{on} = 30$ Ом.

При разработке эквивалентной электрической схемы электродной системы АЭС принимались в расчет следующие факторы [3, 4]. На границе раздела сред «металлический электрод - раствор электролита» образуется двойной электрический слой (ДЭС). ДЭС состоит со стороны раствора из ионов электролита, а со стороны электрода - из электронов или ионов кристаллической решетки. Разделенные заряды ДЭС создают контактную разность потенциалов между металлом и раствором.

Электрическая проводимость границы раздела сред имеет ярко выраженный нелинейный характер. При приложении внешнего электрического поля между электродами, находящимися в растворе электролита, катионы устремляются к катоду, а анионы - к аноду. Но ион, подходящий к металлическому электроду не может сразу же произвести обмен электронами с этим электродом. Ионы накапливаются на границе раздела сред, изменяя при этом зарядовое состояние ДЭС. Переход электронов из раствора в металл или обратно становится возможным только тогда, когда напряжение на двойном электрическом слое достигает определенной величины.

Из сказанного выше следует, что наличие ДЭС ведет к возникновению емкостных свойств контакта «металлический электрод - раствор электролита». При этом электрическая проводимость контакта электрод - раствор электролита зависит от напряжения не линейно. Электрическую проводимость самого раствора электролита можно с хорошей степенью точности считать линейной и определяемой только геометрическими факторами.

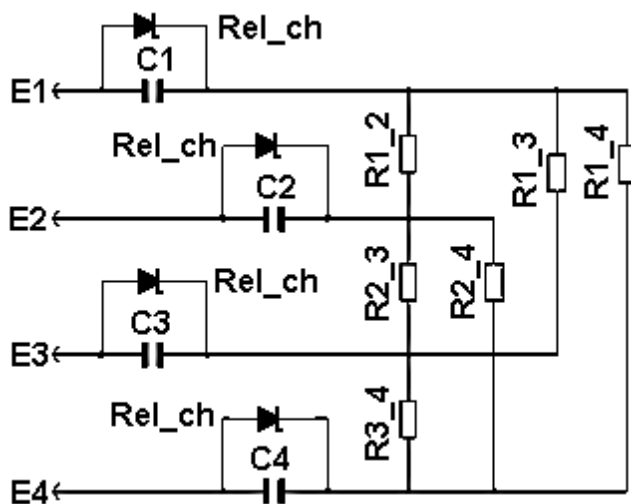


Рис.6. Электрическая эквивалентная схема электродной системы АЭС с сосредоточенными параметрами.

Электрическая эквивалентная схема электродной системы АЭС4, учитывающая приведенные выше соображения, представлена на рис.6. В этой схеме конденсаторы C1, C2, C3, C4 моделируют емкостные свойства ДЭС, образующихся вокруг электродов АЭС: E1, E2, E3 и E4 соответственно. Нелинейные резисторы Rel_ch являются элементами, сопротивление которых моделирует электрическую проводимость границы раздела фаз. Линейные резисторы R1_2, R1_3, R1_4, R2_3, R2_4 и R3_4 моделируют проводимость раствора электролита между соответствующими электродами АЭС.

Было произведено электрическое моделирование работы четырехэлектродного АЭС с применением эквивалентной схемы с рис.6. Установлено, что эквивалентная схема с сосредоточенными RC параметрами (рис.6) дает возможность отразить только общий характер электрических процессов, протекающих при работе АЭС в жидкой среде.

Усовершенствование эквивалентной схемы было осуществлено с учетом распределенного характера RC параметров электродной системы стимулятора. Электрическому току приходится преодолевать большее сопротивление раствора при протекании между более удаленными друг от друга участками электродов, чем при его протекании между соседними участками. Электрическая эквивалентная схема с распределенными RC параметрами показана на рис.7. Значения параметров компонентов этой схемы,

адаптированных для случая АЭС в кислом желудочном соке человека, приведены в таблице.

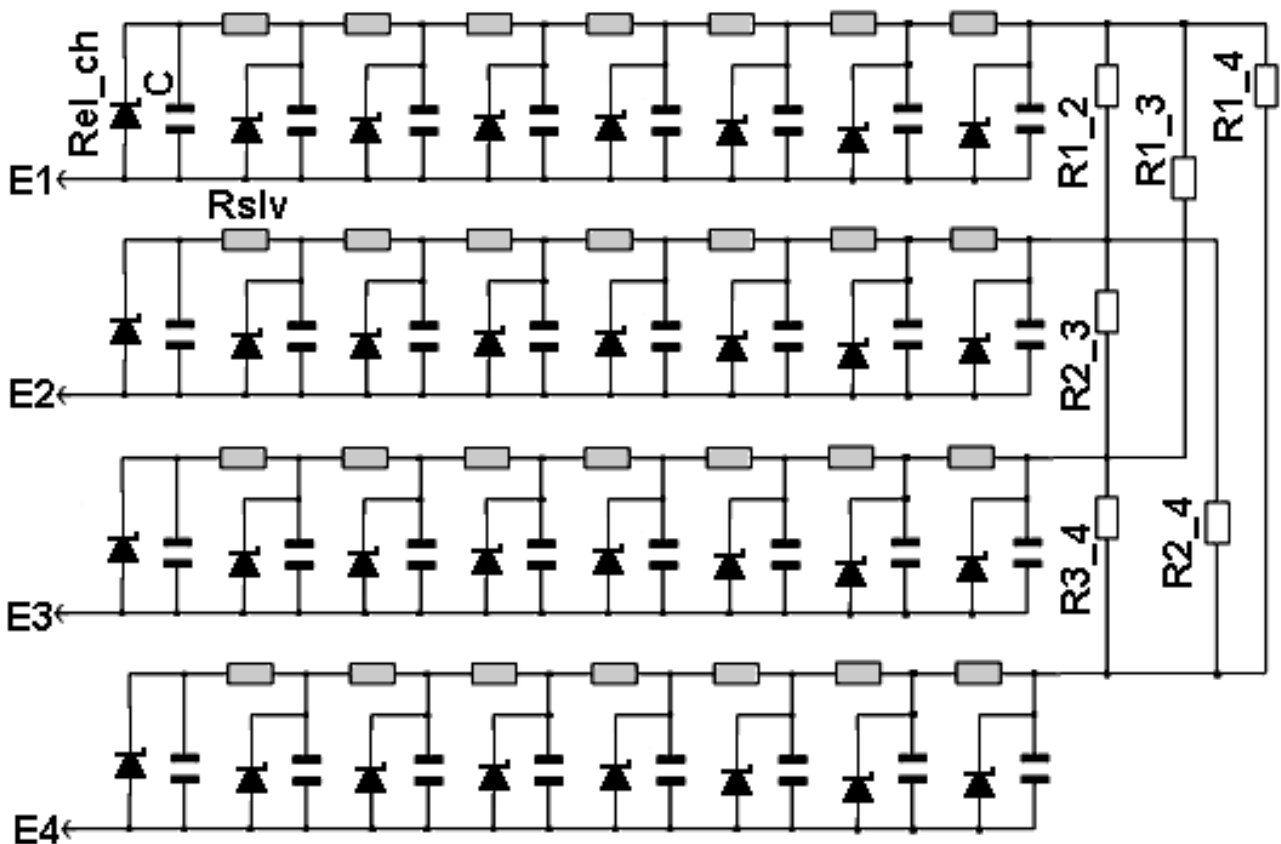


Рис.7. Электрическая эквивалентная схема электродной системы АЭС с распределенными параметрами.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) нелинейного элемента, моделирующего поляризационную кривую электрода АЭС в желудочном соке человека, приведена на рис.8.

При помощи программы PSpice [5] был проведен расчет выходных напряжений АЭС4 с использованием эквивалентной схемы с рис.7. Результатом моделирования явились кривые зависимостей $U(E_i) = F(t)$, приведенные на рис.9. Сопоставление этих кривых с реальными осциллограммами, изображенными на рис.5, позволяет говорить об очень хорошем совпадении теории и эксперимента.

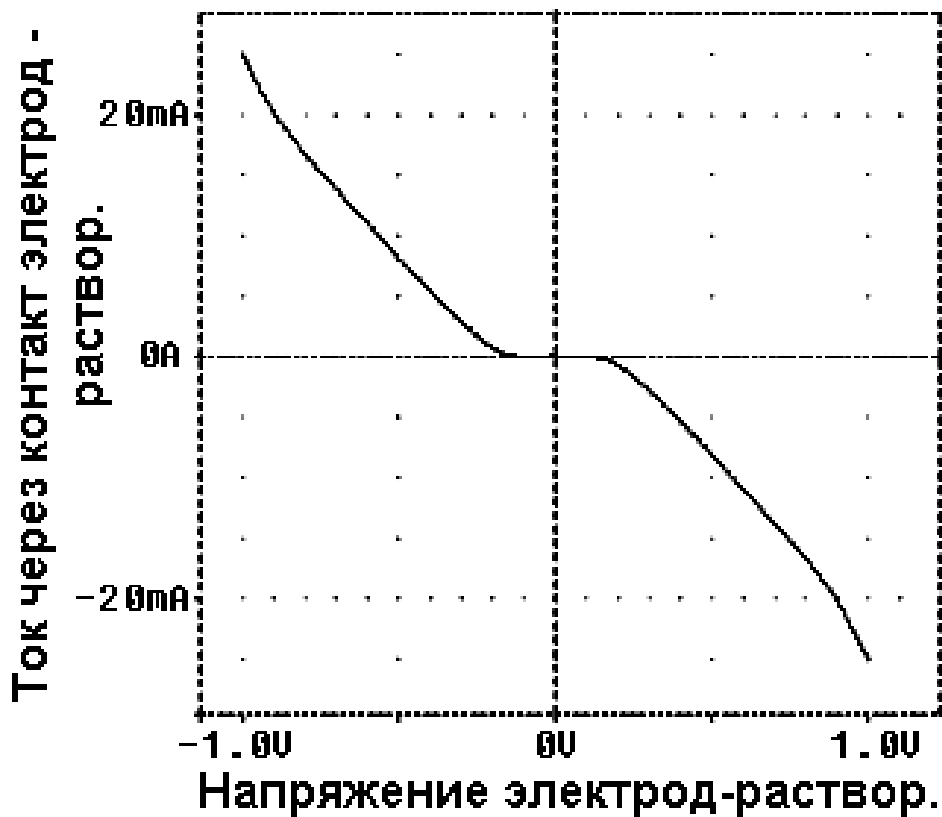


Рис.8. ВАХ нелинейного элемента Rel_ch, моделирующего проводимость границы раздела электрод - раствор.

Таблица

Назначение элемента для моделирования	Емкость ДЭС мкФ	Сопротивление раствора между электродами, Ом			Сопротивление раствора вдоль электрода, Ом	Проводимость контакта «металл - раствор».
		R1_3	R2_3 R2_4	R1_2 R3_4		
Буквенное обозначение на рис.7.	C				Rslv	Rel_ch
Численное значение параметра.	90	130	130	6	15 Ом	См. ВАХ на рис.8.

Имеет место не только качественное, но и довольно точное количественное соответствие между параметрами экспериментальных и расчетных зависимостей $U(E_i)$ от времени. Отклонение кривых рис.9 от

соответствующих им зависимостей $U(E_i) = F(t)$ рис.5 связаны со следующим несовершенством эквивалентной схемы АЭС. А именно: простая резистивная схема, состоящая из элементов R1_2, R1_3, R1_4, R2_3, R2_4, R3_4, не может служить адекватной моделью для сложной картины растекания электрического тока в жидкой среде между четырьмя электродами стимулятора.

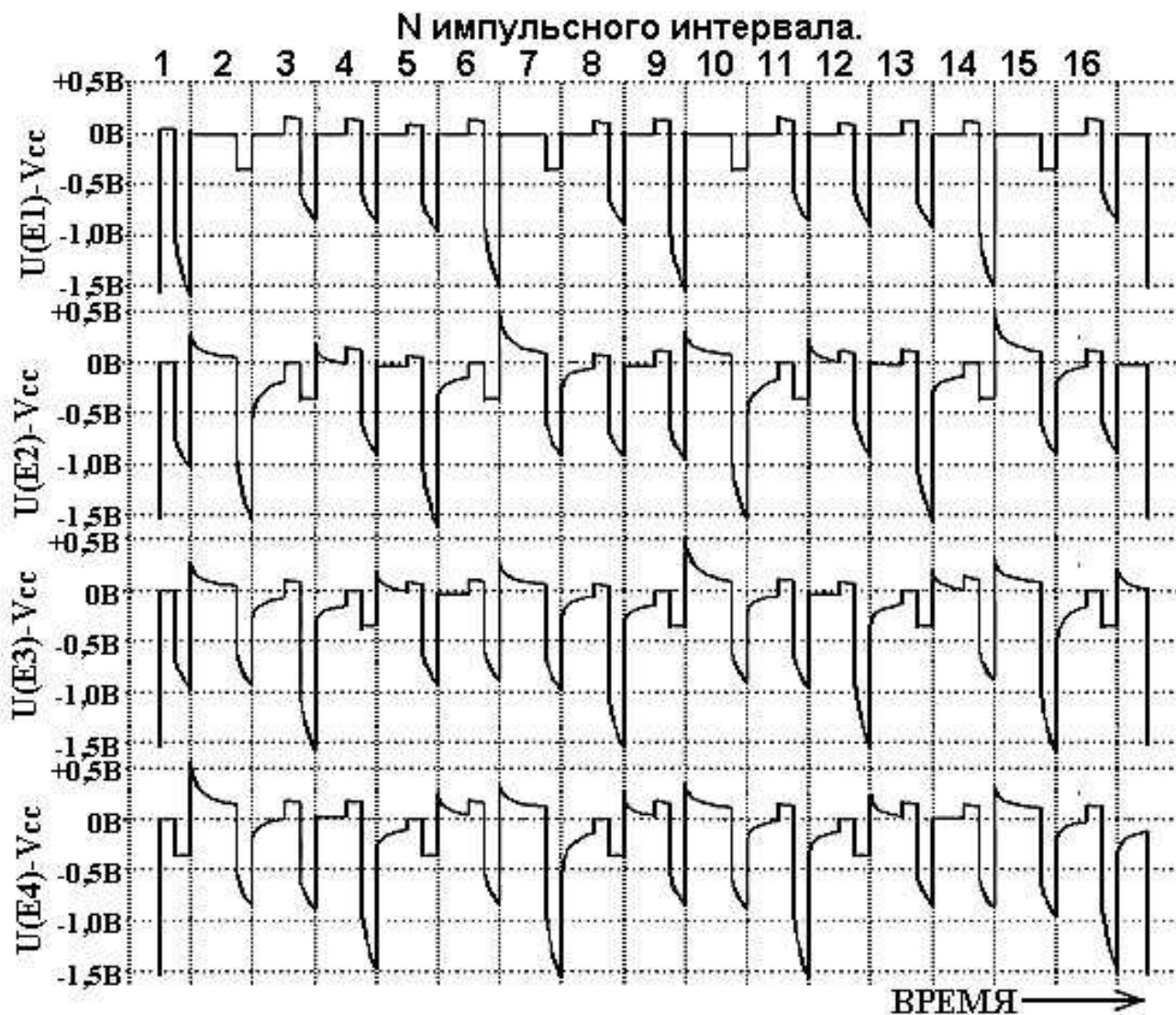


Рис.9. Расчетные временные диаграммы выходных напряжений АЭС.

Модель с распределенными параметрами.

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы. Четырехэлектродный АЭС характеризуется разветвленной конструкцией и сложной системой управления. Работа данного стимулятора в среде водных растворов электролитов сопровождается формированием на его электродах выходных напряжений, сложным образом изменяющихся во

времени. В ходе данного исследования были зафиксированы осциллограммы этих напряжений, в том числе при работе АЭС в кислом желудочном соке человека. Разработанная эквивалентная схема электродной системы позволила провести электрическое моделирование работы АЭС. Было доказано, что указанная эквивалентная схема адекватно отражает реальные электрофизические свойства системы. Созданная таким образом методика моделирования работы АЭС дает хорошее совпадение теории с экспериментом и может быть использована при проектировании новых типов автономных электростимуляторов.

Список литературы:

1. Автономные электростимуляторы организма человека и животных / В.Ф. Агафонников, Г.Ц. Дамбаев., А.Г. Мартусевич и др. -Томск: Сиб. гос. мед. ун-т, 1995.- 131 с.
2. Колесникова С.З. Автономный электростимулятор желудочно-кишечного тракта (АЭС ЖКТ) - анализ исследовательской работы и результатов клинического применения // Медицинская картотека МиРА. 1997. N5. С.4-6.
3. Дэвис С., Джеймс А. Электрохимический словарь. - М.: Мир, 1979.- 288 с.
4. Физическая химия / Под редакцией К.С.Красного. М.: Высш. шк., 1995.
5. Разевиг В.Д. Система схемотехнического проектирования Design Center (PSpice). - М.: СК Пресс. 1996.- 272 с.