

МЕМРИСТОРНЫЕ И РЕАКТИВНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДВУХПОЛЮСНИКИ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MEMRISTOR AND REACTIVE OF HIGHER ORDER LINEAR TIME-DEPENDENT ONE-PORT NETWORKS AND ITS MODELLING

Аннотация. Рассматриваются линейные нестационарные двухполюсники высшего порядка. Они подразделяются на мемристорные и реактивные двухполюсники. Даны модели нестационарных двухполюсников высшего порядка.

Summary. The linear time-dependent one-port networks of higher order are discussed. The obtained classification is divided onto memristor and reactive one-ports. Models of the time-dependent one-port networks of higher order are discussed.

Широкое применение ЭВМ и развитие теории цепей дали мощный толчок для проектирования все более сложных радиотехнических устройств, в частности параметрических приборов. Ужесточение требований к аппаратуре, необходимость учета и применение новых параметрических эффектов явились хорошим стимулом для развития общей теории нестационарных цепей. Использование теории как в традиционных областях – анализа и синтеза, так и в новых направлениях – моделировании, идентификации, развитии качественных методов и т.д. дали новый толчок их развития.

В связи с появлением маломощных устройств для видеоусилителей телевизионных камер на видиконе возникает проблема дальнейшего совершенствования усилительных элементов с низким уровнем шумов [1].

Нерешенная раньше часть общей проблемы маломощного усиления упирается в неясность выбора элементов входного двухполюсника – нагрузочного сопротивления трубки. Традиционно это был емкостной элемент.

Наряду с обычными элементами: резистивными, индуктивными и емкостными, представляющими собой идеализацию реально существующих элементов, рядом авторов предложено ввести новые двухполюсные элементы, называемые элементами высшего порядка [2-8]. Они могут быть реализованы с помощью соответствующих линейных активных цепей.

Число различных элементов высшего порядка может быть бесконечным и счетным. Каждый из них обладает особыми, присущими только ему свойствами и характеристиками.

В литературе отмечалось, что использование линейных и нелинейных идеальных преобразователей [9-11] позволяет создать модели цепей как линейных, так и нелинейных. Однако в литературе созданию моделей нестационарных цепей уделено недостаточно внимания.

Поэтому целью данной работы – дальнейшее изучение нестационарных двухполюсников (НстДВП), представление их в виде мемристорных и реактивных двухполюсников и дать примеры построения их моделей.

1. Нестационарные двухполюсники высшего порядка. Элементы высшего порядка НстДВП можно ввести формальным обобщением характеристик обычных элементов. Для этого применяются операторы дифференцирования

$$p = \frac{d}{dt}; \quad p^n = \frac{d^n}{dt^n}; \quad \dots \quad p^{-1} = \int_{-\infty}^t dt; \quad p^{-n} = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \dots \int_{-\infty}^t (dt)^n. \quad (1)$$

Семейство определений НстДВП удобно представить в табл.1, при этом используется понятие **h-n** плоскости [12-14]. В таблице представлены нестационарные мемристорные (резисторы с памятью) и реактивные z-двухполюсники, описанные параметром $z(p,t)$ в **u-i** базе. Здесь напряжение $u = u(t)$, ток $i = i(t)$, время t , параметр двухполюсника $z(p,t) = p^h a p^n$. Накачка определяется по терминологии параметрических схем и представляет форму изменения параметра – z-накачка или u-накачка.

Таблица1 – Временные представления НстДВП

Представление	$a(t)$	$a^{-1}(t)$
Базис	$u - i$	$i - u$
Параметр двухполюсника	$z(p,t)$	$z^{-1} = y(p,t)$
Временное представление	$u = p^h a p^n i$	$i = p^{-n} a^{-1} p^{-h} u$
Накачка	z-накачка	u-накачка

В табл. 2 приведены z -двухполюсники. Здесь по столбцам указаны значения $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, по строкам – значения $h = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, причем $u = z(p,t) i$.

В табл. 3 представлено семейство нестационарных y -двухполюсников в $i - u$ базисе. Здесь $y(p,t) = p^{-n} a^{-1} p^{-h}$. По столбцам указаны значения $h = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ и по строкам значения $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$.

Дальнейшие рассуждения приводят нас к математическому понятию группы. Лишь тогда мы можем сравнить z - и y -двухполюсники.

Повторим, что накачка, т.е. закон вариации параметра, подразделяется на z -накачку и на y -накачку. Здесь $a(t)$ и $a^{-1}(t)$ непосредственно связаны с так называемой накачкой. Не будем уточнять подробности накачки, но $a(t) = 1 / a^{-1}(t) \neq 0$ при любом t (приходим к математическому понятию группы).

2. Разделение семейств нестационарных двухполюсников на мемристорные и реактивные множества. Обратимся к табл. 2. Выделим множество мемристоров и представим их отдельно. Полученное семейство бесконечно во все четыре стороны от места $r_{0,0}$; но матрица мемристоров получилась с “пустыми” местами, где до этого помещались реактивные элементы.

Табл. 4 – матрица резистивных двухполюсников – мемристоров. По вертикали они классифицируются дополнительно как e_{Σ} – и d_{Σ} – элементы, причем порядок задает характеристическая константа $\Sigma = h + n = \dots, 2, 1, 0, -1, -2, \dots$, определяемая как сумма индексов h и n .

По горизонтали расположены мемристоры одного порядка соответствующих вышеназванных элементов. Привязка осуществляется к одному из индексов, в данной таблице к n .

В центре таблицы представлен резистор $r_{0,0}$ и уже от него влево и вправо расположены мемристоры. Резистор нулевого порядка имеет характеристическую константу

$$\Sigma = h + n = 1 + (-1) = 0.$$

В нестационарных системах при изменяющихся во времени параметрах (или коэффициентах эквивалентных дифференциальных уравнений) влияние оператора p существенно зависит от его местоположения в формуле – определении.

В табл. 4 представлено все семейство нестационарных двухполюсников-мемристоров в $u-i$ базисе:

$$u = z(p,t) i,$$

где $z(p,t) = p^{h+n} a_{h+n,n}(t) p^n$.

Здесь по строкам указано значение $\Sigma = h+n = \dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots$, по столбцам – значение $n = \dots, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$. Матрица получилась без “пустот”.

Аналогично в табл. 5 представлено семейство нестационарных реактивных двухполюсников в $u-i$ базисе: $u = z(p,t) i$, где $z(p,t) = p^{h+n} a_{h+n,n}(t) p^n$. В табл. 5 также по строкам указано значение $\Sigma = h + n = \dots, -5, -3, -1, 1, 3, 5, \dots$, по столбцам – значение $n = \dots, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, \dots$; матрица также получилась без “пустот”.

Таблица 2 – Семейство нестационарных z-двухполюсников в $u-i$ базисе: $u = z(p,t) i$, где $z(p,t) = p^h a_{h,n}(t) p^n$

$n \backslash h$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
5						...					
4					...	$p^4 r_{4,0} p^0$ Мемристор	...				
3				...	$p^3 r_{3,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^3 l_{3,0} p^0$ Индуктивность	$p^3 r_{3,1} p^1$ Мемристор	...			
2			...	$p^2 r_{2,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^2 l_{2,-1} p^{-1}$ Индуктивность	$p^2 r_{2,0} p^0$ Мемристор (e-элемент)	$p^2 l_{2,1} p^1$ Индуктивность	$p^2 r_{2,2} p^2$ Мемристор	...		
1		...	$p^1 r_{1,-3} p^{-3}$ Мемристор	$p^1 c_{1,-2} p^{-2}$ Обратная емкость	$p^1 m_{1,-1} p^{-1}$ Мемристор (Сiuа-элемент)	$p^1 l_{1,0} p^0$ Индуктивность	$p^1 r_{1,1} p^1$ Мемристор	$p^1 l_{1,2} p^2$ Индуктивность	$p^1 r_{1,3} p^3$ Мемристор	...	
0	...	$p^0 r_{0,-4} p^{-4}$ Мемристор	$p^0 c_{0,-3} p^{-3}$ Обратная емкость	$p^0 r_{0,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^0 c_{0,-1} p^{-1}$ Обратная емкость	$r_{0,0}$ Резистор	$p^0 l_{0,1} p^1$ Индуктивность	$p^0 r_{0,2} p^2$ Мемристор	$p^0 l_{0,3} p^3$ Индуктивность	$p^0 r_{0,4} p^4$ Мемристор	...
-1		...	$p^{-1} r_{-1,-3} p^{-3}$ Мемристор	$p^{-1} c_{-1,-2} p^{-2}$ Обратная емкость	$p^{-1} r_{-1,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^{-1} c_{-1,0} p^0$ Обратная емкость	$p^{-1} r_{-1,1} p^1$ Мемристор (Дифференциальный резистор)	$p^{-1} l_{-1,2} p^2$ Индуктивность	$p^{-1} r_{-1,3} p^3$ Мемристор	...	
-2			...	$p^{-2} r_{-2,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^{-2} c_{-2,-1} p^{-1}$ Обратная емкость	$p^{-2} r_{-2,0} p^0$ Мемристор (d-элемент)	$p^{-2} c_{-2,1} p^1$ Обратная емкость	$p^{-2} r_{-2,2} p^2$ Мемристор	...		
-3				...	$p^{-3} r_{-3,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^{-3} c_{-3,0} p^0$ Обратная емкость	$p^{-3} r_{-3,1} p^1$ Мемристор	...			
-4					...	$p^{-4} r_{-4,0} p^0$ Мемристор	...				
-5						...					

Таблица 3 – Семейство нестационарных u -двухполюсников в i - u базисе: $i = y(p,t) u$, где $y(p,t) = p^{-n} a^{-1}_{h,n}(t) p^{-h}$

$N \backslash h$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
5						...					
4					...	$p^0 g_{4,0} p^{-4}$ Обр. мемристор	...				
3				...	$p^1 g_{3,-1} p^{-3}$ Обр. мемристор	$p^0 l_{3,0}^{-1} p^{-3}$ Обратная индуктивность	$p^{-1} g_{3,1} p^{-3}$ Обр. мемристор	...			
2			...	$p^2 g_{2,-2} p^{-2}$ Обр. мемристор	$p^1 l_{2,-1}^{-1} p^{-2}$ Обратная индуктивность	$p^0 g_{2,0} p^{-2}$ Обр. мемристор (e^{-1} -элемент)	$p^{-1} l_{2,1}^{-1} p^{-2}$ Обратная индуктивность	$p^{-2} g_{2,2} p^{-2}$ Обр. мемристор	...		
1		...	$p^3 g_{1,-3} p^{-1}$ Обр. мемристор	$p^2 c_{1,-2} p^{-1}$ Емкость	$p^1 m_{1,-1}^{-1} p^{-1}$ Обр. мемристор (Шуа-элемент)	$p^0 l_{1,0}^{-1} p^{-1}$ Обратная индуктивность	$p^{-1} g_{1,1} p^{-1}$ Обр. мемристор	$p^{-2} l_{1,2}^{-1} p^{-1}$ Обратная индуктивность	$p^{-3} g_{1,3} p^{-1}$ Обр. мемристор	...	
0	...	$p^4 g_{0,-4} p^0$ Обр. мемристор	$p^3 c_{0,-3} p^0$ Емкость	$p^2 g_{0,-2} p^0$ Обр. мемристор	$p^1 c_{0,-1} p^0$ Емкость	$r^{-1} = g_{0,0}$ Проводимость	$p^{-1} l_{0,1}^{-1} p^0$ Обратная индуктивность	$p^{-2} g_{0,2} p^0$ Обр. мемристор	$p^{-3} l_{0,3}^{-1} p^0$ Обратная индуктивность	$p^{-4} g_{0,4} p^0$ Обр. мемристор	...
-1		...	$p^3 g_{-1,-3} p^1$ Обр. мемристор	$p^2 c_{-1,-2} p^1$ Емкость	$p^1 g_{-1,-1} p^1$ Обр. мемристор	$p^0 c_{-1,0} p^1$ Емкость	$p^{-1} g_{-1,1} p^1$ Обр. мемристор (Дифференциальная проводимость)	$p^{-2} l_{-1,2}^{-1} p^1$ Обратная индуктивность	$p^{-3} g_{-1,3} p^1$ Обр. мемристор	...	
-2			...	$p^2 g_{-2,-2} p^2$ Обр. мемристор	$p^1 c_{-2,-1} p^2$ Емкость	$p^0 g_{-2,0} p^2$ Обр. мемристор (d^{-1}-элемент)	$p^{-1} c_{-2,1} p^2$ Емкость	$p^{-2} g_{-2,2} p^2$ Обр. мемристор	...		
-3				...	$p^1 g_{-3,-1} p^3$ Обр. мемристор	$p^0 c_{-3,0} p^3$ Емкость	$p^{-1} g_{-3,1} p^3$ Обр. мемристор	...			
-4					...	$p^0 g_{-4,0} p^4$ Обр. мемристор	...				
-5						...					

Таблица 4 – Нестационарные двухполюсники-мемристоры в $u-i$ базисе: $u = z(p,t) i$, где $z(p,t) = p^{h+n} a_{h+n,n}(t) p^n$

n $\Sigma = h+n$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
6			...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	$p^4 r_{4,0} p^0$ Мемристор	$p^3 r_{3,1} p^1$ Мемристор	$p^2 r_{2,2} p^2$ Мемристор	$p^1 r_{1,3} p^3$ Мемристор	$p^0 r_{0,4} p^4$ Мемристор	...
2	...	...	...	$p^3 r_{3,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^2 r_{2,0} p^0$ Известный мемристор (e-элемент)	$p^1 r_{1,1} p^1$ Мемристор	$p^0 r_{0,2} p^2$ Мемристор	$p^{-1} r_{-1,3} p^3$ Мемристор	...	...
0	...	...	$p^2 r_{2,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^1 m_{1,-1} p^{-1}$ Известный мемристор (Chua-элемент)	$r_{0,0}$ Резистор	$p^{-1} r_{-1,1} p^1$ Мемристор (Дифференциальный резистор)	$p^{-2} r_{-2,2} p^2$ Мемристор	...	...	...
-2	...	$p^1 r_{1,-3} p^{-3}$ Ме Мемристор	$p^0 r_{0,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^{-1} r_{-1,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^{-2} r_{-2,0} p^0$ Известный мемристор (d-элемент)	$p^{-3} r_{-3,1} p^1$ Мемристор	...	...	...
-4	$p^0 r_{0,-4} p^{-4}$ Мемристор	$p^{-1} r_{-1,-3} p^{-3}$ Мемристор	$p^{-2} r_{-2,-2} p^{-2}$ Мемристор	$p^{-3} r_{-3,-1} p^{-1}$ Мемристор	$p^{-4} r_{-4,0} p^0$ Мемристор	...	...	...
-6	...	...	...	...	...	...	...

Таблиця 5 – Нестационарные реактивные двухполосники в $u-i$ базисе: $u = z(p,t) i$, где $z(p,t) = p^{h+n} a_{h+n,n}(t) p^n$

n $\Sigma = h+n$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
9			
7	...	$p^{10}l_{10,-3}p^{-3}$ Индуктивность	$p^9l_{9,-2}p^{-2}$ Индуктивность	$p^8l_{8,-1}p^{-1}$ Индуктивность	$p^7l_{7,0}p^0$ Индуктивность	$p^6l_{6,1}p^1$ Индуктивность	$p^5l_{5,2}p^2$ Индуктивность	$p^4l_{4,3}p^3$ Индуктивность	...	
5	...	$p^8l_{8,-3}p^{-3}$ Индуктивность	$p^7l_{7,-2}p^{-2}$ Индуктивность	$p^6l_{6,-1}p^{-1}$ Индуктивность	$p^5l_{5,0}p^0$ Индуктивность	$p^4l_{4,1}p^1$ Индуктивность	$p^3l_{3,2}p^2$ Индуктивность	$p^2l_{2,3}p^3$ Индуктивность	...	
3	...	$p^6l_{6,-3}p^{-3}$ Индуктивность	$p^5l_{5,-2}p^{-2}$ Индуктивность	$p^4l_{4,-1}p^{-1}$ Индуктивность	$p^3l_{3,0}p^0$ Индуктивность	$p^2l_{2,1}p^1$ Индуктивность	$p^1l_{1,2}p^2$ Индуктивность	$p^0l_{0,3}p^3$ Индуктивность	...	
1	...	$p^4l_{4,-3}p^{-3}$ Индуктивность	$p^3l_{3,-2}p^{-2}$ Индуктивность	$p^2l_{2,-1}p^{-1}$ Индуктивность	$p^1l_{1,0}p^0$ Известная Индуктивность	$p^0l_{0,1}p^1$ Индуктивность	$p^{-1}l_{-1,2}p^2$ Индуктивность	$p^{-2}l_{-2,3}p^3$ Индуктивность	...	
-1	...	$p^2c_{2,-3}^{-1}p^{-3}$ Обратная емкость	$p^1c_{1,-2}^{-1}p^{-2}$ Обратная емкость	$p^0c_{0,-1}^{-1}p^{-1}$ Обратная емкость	$p^{-1}c_{-1,0}^{-1}p^0$ Известная обратная емкость	$p^{-2}c_{-2,1}^{-1}p^1$ Обратная емкость	$p^{-3}c_{-3,2}^{-1}p^2$ Обратная емкость	$p^{-4}c_{-4,3}^{-1}p^3$ Обратная емкость	...	
-3	...	$p^0c_{0,-3}^{-1}p^{-3}$ Обратная емкость	$p^{-1}c_{-1,-2}^{-1}p^{-2}$ Обратная емкость	$p^{-2}c_{-2,-1}^{-1}p^{-1}$ Обратная емкость	$p^{-3}c_{-3,0}^{-1}p^0$ Обратная емкость	$p^{-4}c_{-4,1}^{-1}p^1$ Обратная емкость	$p^{-5}c_{-5,2}^{-1}p^2$ Обратная емкость	$p^{-6}c_{-6,3}^{-1}p^3$ Обратная емкость	...	
-5	...	$p^{-2}c_{-2,-3}^{-1}p^{-3}$ Обратная емкость	$p^{-3}c_{-3,-2}^{-1}p^{-2}$ Обратная емкость	$p^{-4}c_{-4,-1}^{-1}p^{-1}$ Обратная емкость	$p^{-5}c_{-5,0}^{-1}p^0$ Обратная емкость	$p^{-6}c_{-6,1}^{-1}p^1$ Обратная емкость	$p^{-7}c_{-7,2}^{-1}p^2$ Обратная емкость	$p^{-8}c_{-8,3}^{-1}p^3$ Обратная емкость	...	
-7	...	$p^{-4}c_{-4,-3}^{-1}p^{-3}$ Обратная емкость	$p^{-5}c_{-5,-2}^{-1}p^{-2}$ Обратная емкость	$p^{-6}c_{-6,-1}^{-1}p^{-1}$ Обратная емкость	$p^{-7}c_{-7,0}^{-1}p^0$ Обратная емкость	$p^{-8}c_{-8,1}^{-1}p^1$ Обратная емкость	$p^{-9}c_{-9,2}^{-1}p^2$ Обратная емкость	$p^{-10}c_{-10,3}^{-1}p^3$ Обратная емкость	...	
-9			

3. Моделирование НстДВП. Ниже представлены две схемы, с помощью которых можно моделировать НстДВП, а именно входное полное сопротивление для мгновенных значений u и i .

Итак, НстДВП $a = a(t)$ и два определения в виде "полное сопротивление" $u = p^h a p^n i$ и "полная проводимость" $i = p^n a^{-1} p^h u$.

1) Первая схема моделирования представлена на рис. 1.

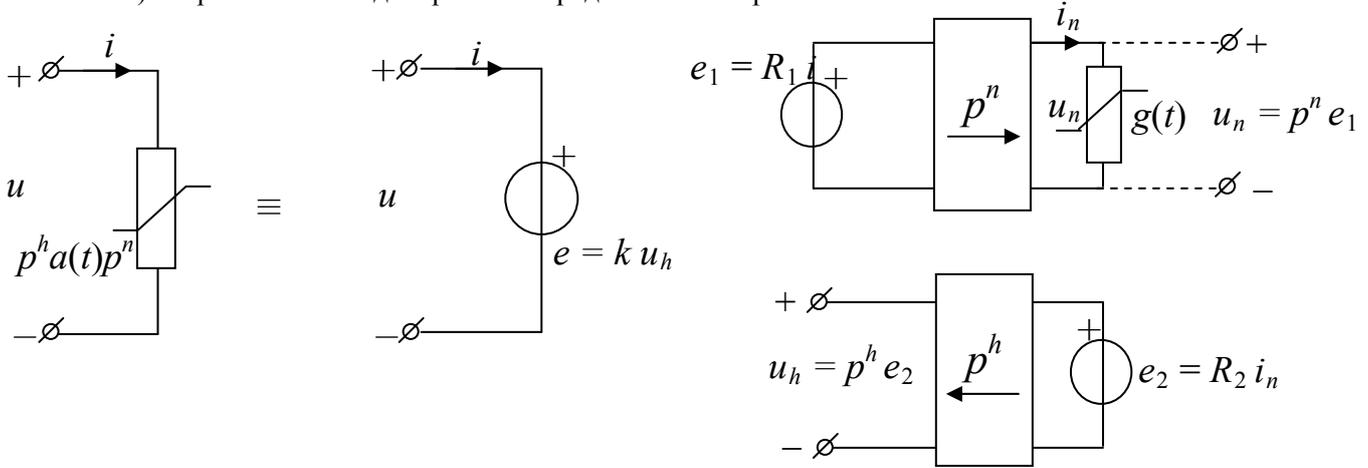


Рисунок 1 – 1-я схема для моделирования нестационарного сопротивления двухполюсника высшего порядка $p^h a(t) p^n$ с помощью $g(t)$

В схеме использованы три независимых источника, два дифференциатора (если $h > 0, n > 0$ или один – два интегратора, если один или оба эти параметра отрицательны), а также нестационарный двухполюсник $g(t)$ (учитываем, что имеем дело с группой, т.е. $g(t) > 0$).

Для напряжения на входе схемы запишем уравнение

$$u = e = k u_h = k p^h u_2 = k p^h e_2 = k R_2 p^h i_n = k R_2 p^h g(t) u_n = k R_2 p^h g(t) p^n e_1 = p^h k R_2 g(t) p^n R_1 i.$$

Следовательно, для этой схемы справедливо выражение (2)

$$u = p^h k R_1 R_2 g(t) p^n i = p^h a(t) p^n i. \quad (2)$$

Таким образом, получено нестационарное сопротивление.

2) Вторая схема моделирования представлена на рис. 2. Схема позволяет моделировать нестационарную проводимость.

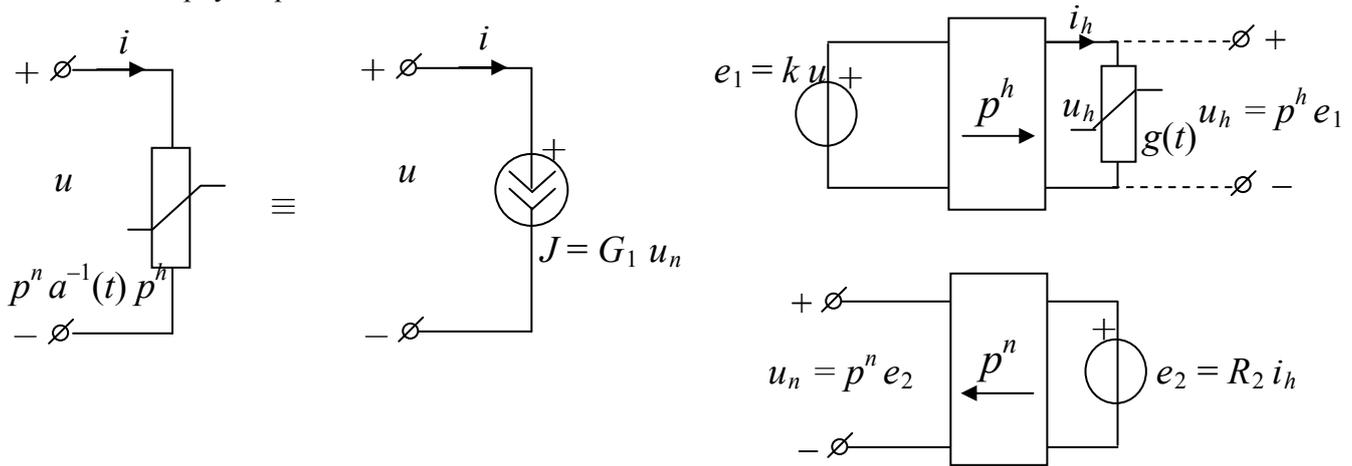


Рисунок 2 – 2-я схема для моделирования нестационарной проводимости двухполюсника высшего порядка $p^n a^{-1}(t) p^h$ с помощью $g(t)$

Запишем для нее выражение, представленное ниже

$$i = J = G u_n = G p^n e_2 = G p^n R_2 i_h = G R_2 p^n g(t) u_h = G R_2 p^n g(t) p^h e_1 = G R_2 p^n g(t) p^h k u.$$

Следовательно, для схемы справедливо выражение (3)

$$i = p^n G R_2 k g(t) p^h u = p^n a^{-1}(t) p^h u, \quad (3)$$

т.е. получена нестационарная проводимость.

Інтегратор (дифференціатор) может выполняться в виде известных схем и пассивного RC -звена (или активной RC -цепи с операционным усилителем). Обе реальные схемы имеют погрешности, приводящие к искажениям. Соответственно этому характеристики реализующей схемы будут отличаться от характеристик идеального элемента высшего порядка.

При необходимости можно введением дополнительных параметров в схему замещения учесть влияние реальных интеграторов на искажения частотных характеристик элементов высшего порядка.

В качестве $g(t)$ можно использовать балансный модулятор на емкостных диодах, интегральные магнитные компоненты, такие как паратрансы, трансформаторы-модуляторы на различных формах магнитопроводов и тонких магнитных пленках, (схемы Задерей [15-20]) и т.д.

В заключение скажем следующее:

1. Предложено представление НстДВП в виде таблиц мемристорных и реактивных двухполюсников.
2. Основные их свойства необходимо изучить методами спектроскопии. Те типы, у которых спектроскопия обнаружит полезные свойства, можно попытаться внедрить в практику. Целесообразны подробные каталоги спектров, так как они могут помочь в задаче синтеза различных устройств.
3. Предложены две схемы для моделирования НстДВП.

Литература

1. Арбузников В.А., Бельдюгин В.Н., Ракоед А.Ф. Параметрический балансный видеоусилитель // Вопросы электросвязи. – К.: Техніка, 1969. – С. 35-42.
2. Philippow E. Lineare und nichtlineare Transformationsvierpole - Grundlagen, Ertwurt, Anwendung // Z. f. elektr. Inform. und Energietechnik. Leipzig. – 1977. – 7. – P. 549-567.
3. Philippow E., Brückner P. Anwendung künstlicher Elemente höherer Ordnung in selektiven Schaltungen // 23 IWK. TH Ilmenau. 1978. Vortragsreihe Theoretische Elektrotechnik. – P. 21-26.
4. Philippow E., Reinhard M. Beitrag zur Theorie der Kunstlichen Elemente hoherer Ordnung. / IWK TH1, 1981.
5. Иваницкий А. М. Получение расширенного набора элементов электрических цепей / Гос. бюджетная НИР кафедры ТЛЭЦ «Исследование активных преобразователей и фильтров», 1981/1982 уч. год. – Одесса, 1982. – Гос. регистрация 80073970.
6. Филиппов Е. С., Качан В. И. Математическое описание и устойчивость цепей с искусственными элементами высокого порядка // Изв. ВУЗ. Энергетика. – 1983. – Т. 8, № 8. – С. 24-27.
7. Данилов Л. В., Матханов П. Н., Филиппов Е. С. Теория нелинейных электрических цепей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 256 с.
8. Kouril F., Vrba K. Non-linear and parametric circuits. Principles, theory and applications. – Ellis Horwood Limited, John Wiley & Sons, 1988. – 413 p.
9. Иваницкий А. М. Нелинейный многополюсные идеальные преобразователи. – М., 1987. – 36 с. – Деп. В ЦНТИ «Информсвязь» 13.05.87, N1108-св; опубл. БУ «Деп. рук.» № 9, 1987.
10. Иваницкий А. М. Математическое моделирование нелинейных многополюсников // Современные проблемы теории электрических цепей и сигналов: Межведомственный тематический научный сборник. – Таганрог: ТРТИ, 1990. – Вып. 1. – С. 14-19.
11. Иваницкий А. М., Олешко П.Я. Исследование идеальные активных преобразователи с симметрией относительно земли. – М., 1976. – НИИЭИР. – 29 с. – Справка о депонировании рукописи № 3-5698–РЖ серия: Общетехническая № 17, 1978 г. ВИМИ.
12. Арбузников В. А., Варава Ю. В. Автоматическое проектирование алгебраических цепей. Определения. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2002. – № 3. – С. 6 – 19.
13. Арбузников В.А., Варава Ю.В. Внешние дополнения для нестационарных двухполюсников // Праці УНДІРТ. – 2007. – № 1 (49). – С. 10-20.
14. Арбузников В.А., Варава Ю.В. Нестационарные двухполюсники // Праці науково-практичної конференції «Перспективні технологічні та ринкові напрями розвитку телекомунікаційних послуг у новітніх безпроводових системах зв'язку», Одеса, 22-24 березня 2007 року. – Одеса, 2007. – С. 3-6.
15. Интегральные магнитные радио компоненты / Г.П. Задерей и др., 1973. – № 3. – 68 с.
16. Задерей Г.П. Физические условия реализации временной вариантности в трансформаторах // Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1974. – Вып. 3. – С. 50-58.
17. Задерей Г.П. Предпосылки к построению магнитных многофункциональных узлов // Радиотехника. – 1975. – № 8. – С.1-6.
18. Задерей Г.П. Многофункциональные магнитные радиокомпоненты в современных устройствах питания радиоэлектронной аппаратуры // Зарубежная радиоэлектроника. – 1978. – № 7. – С. 39-49.
19. Задерей Г.П. Устройства питания на основе многофункциональных электронно-магнитных трансформаторов // Электронная промышленность. – 1979. – Вып. 7. – С. 14 -18.
20. Задерей Г. П. Многофункциональные магнитные компоненты (многофункциональные электронно-магнитные трансформаторы). – М.: Сов. радио, 1980. – 137 с.