

17. Weinreb K., W?giel T., Su?owicz M. Influence of the Main Magnetic Circuit Saturation on Stator Current Spectrum for a Cage Induction Motor with Rotor Asymmetry. — Czasopismo Techniczne PK, 2006, Z.3.

18. Вейнреб К. Обнаружение динамического эксцентриситета и обрыва стержней клетки в асинхронном двигателе методом спектрального анализа тока статора. — Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2008, № 1(53).

[21.11.11]

* * *

Автор: **Вейнреб Конрад** окончил в 1973 г. электротехнический факультет Горно-металлургической академии в Кракове. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гармонический анализ токов и электромагнитного момента в несимметрических состояниях работы асинхронных машин». Адъюнкт кафедры электрических машин, заместитель директора Института электромеханических преобразований энергии Краковской политехники, Польша.

Обобщенный принцип наложения для линейных электрических цепей

КУРГАНОВ С.А., ФИЛАРЕТОВ В.В.

Сформулирован обобщенный принцип наложения: отклик в линейной электрической цепи равен линейной комбинации двух частичных откликов, получающихся при наличии и отсутствии независимого источника, при замыкании и размыкании резистора, при замене нулором и нейтрализации управляемого источника. Формулы наложения обобщены для произвольного числа элементов и могут применяться как для экспериментальных исследований, так и для численных расчетов.

Ключевые слова: принцип суперпозиции, размыкание и замыкание, выделение элементов

Классический принцип наложения формулируется следующим образом. Отклик в линейной электрической цепи (ЛЭЦ) при одновременном воздействии нескольких независимых источников (НИ) равен алгебраической сумме частичных откликов при воздействии каждого из источников в отдельности [1]. При исследовании воздействия одного из n источников, например номером i , отклик в ЛЭЦ равен сумме откликов при воздействии НИ x_i и при воздействии остальных источников:

$$O = O(x_i) + O(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n; x_k^{-1} x_i), \quad (1)$$

где $O(x_i)$ — отклик при воздействии i -го источника, представлен в комплексной или операторной форме для анализа цепи в гармоническом или переходном режимах соответственно; n — общее число НИ.

Формула (1) отражает фактически смешанную явно-неявную форму принципа наложения — явную для источника x_i и неявную для остальных источников, поскольку второе слагаемое может быть раскрыто произвольным образом и параметры отдельных или всех источников могут повторяться в

The generalized principle of superposition in linear electric circuits is formulated as follows: the response in a linear electric circuit is equal to a linear combination of two partial responses obtained with and without an independent source, during connection and disconnection of a resistor, and when a controlled source is replaced by a nullor and neutralized. The superposition formulas are generalized for an arbitrary number of elements and can be used both for experimental studies and in numerical calculations.

Key words: superposition principle, disconnection, closing, separation of elements

выражении неоднократно [2]. Целью статьи является обобщение формулы (1) для произвольных элементов цепи.

Обобщенный принцип наложения для одного элемента. Отклик в ЛЭЦ равен линейной комбинации двух частичных откликов:

$$O = k_1 O_1 + k_2 O_2, \quad (2)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты вклада частичных откликов в общий отклик; O_1, O_2 — частичные отклики, получающиеся при определенных операциях с исследуемым элементом, которые будут определены ниже.

Для независимого источника частичный отклик O_1 измеряется в схеме, в которой действует один исследуемый элемент, все остальные НИ нейтрализуются — их параметры приравниваются к нулю. Другой частичный отклик измеряется в схеме, в которой нейтрализуется исследуемый источник, а все остальные функционируют. Очевидно, коэффициенты вклада частичных откликов равны единице. Ниже выражения для этих коэффициентов выводятся для резистора и управляемых источников.

Коэффициенты вклада частичных откликов при выделении резистора. Для определения искомого коэффициента необходимо записать выражение для напряжения \underline{U} в схеме на рис. 1,а в виде суммы двух составляющих (2).

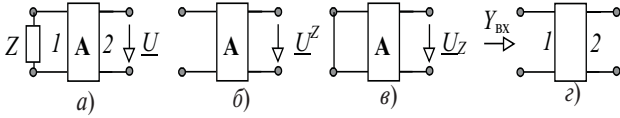


Рис. 1. Схема с сопротивлением Z : исходная автономная схема (а); схемы (б), (в) и (з) – для измерения напряжений $\underline{U}^Z, \underline{U}_Z$ и входной проводимости $Y_{\text{вх}}$

Запишем выражение для искомого напряжения, используя понятие определителя автономной схемы [3], в схемно-алгебраическом виде:

$$\underline{U} = \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } Z, A, U \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } Z, A \end{array} \right|}, \quad (3)$$

где определители схем числителя и знаменателя обозначены парой вертикальных линий.

Схема числителя получается из исходной автономной схемы на рис. 1,а путем замены независимых источников (не показаны на рис. 1,а) и приемника напряжения одним многомерным источником, управляемым направленным нуллатором [4]. Таким образом, парный норатор к нуллатору в числителе (3) появляется после выделения независимых источников ЭДС и тока. Схема знаменателя является неавтономной схемой, полученной также из исходной автономной схемы путем нейтрализации НИ, т.е. приравнивая их параметров к нулю.

Выделив сопротивление Z в числителе и знаменателе (3) по формуле Фойснера [5, 6], получим:

$$\underline{U} = \frac{Z \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A, U \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|}{Z \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A, U \end{array} \right|}. \quad (4)$$

Разделим и умножим каждое слагаемое числителя (4) на соответствующий схемный минор из знаменателя, при этом поставим условие, что оба схемных минора отличны от нуля. В результате получим:

$$\underline{U} = \frac{Z \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A, U \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|} + \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|}}{Z \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|} + \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A, U \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with } A \end{array} \right|}}. \quad (5)$$

Последнюю формулу можно записать в алгебраическом виде:

$$\underline{U} = [Z \underline{U}^Z D^Z + \underline{U}_Z D_Z] / (Z D^Z + D_Z), \quad (6)$$

где верхний и нижний индексы у переменной \underline{U} и определителя D означают, что они находятся по схеме при удаленном (разомкнутом) и стянутом (замкнутом) сопротивлении Z соответственно.

Формула (6) известна как обобщенная формула метода эквивалентного генератора [7]. В то же время эта формула отражает наложение частичных откликов, получающихся при размыкании и замыкании сопротивления Z . Сравнивая формулы (2) и (6), можно записать

$$\underline{U} = k_1 \underline{U}^Z + k_2 \underline{U}_Z, \quad (7)$$

где коэффициенты вклада частичных откликов определяются как

$$k_1 = \frac{Z D^Z}{Z D^Z + D_Z}; \quad k_2 = \frac{D_Z}{Z D^Z + D_Z}. \quad (8)$$

Частичные отклики $\underline{U}^Z, \underline{U}_Z$ и коэффициенты k_1 и k_2 для формулы (7) могут быть найдены из (8) расчетным путем. Для экспериментальных исследований эти формулы непригодны, поскольку содержат схемные миноры. Для приведения их к виду, допускающему нахождение коэффициентов k_1 и k_2 с помощью измерений, разделим числители и знаменатели (8) на D_Z :

$$k_1 = \frac{Z Y_{\text{вх}}}{Z Y_{\text{вх}} + 1}; \quad k_2 = \frac{1}{Z Y_{\text{вх}} + 1}, \quad (9)$$

где $Y_{\text{вх}} = D^Z / D_Z$ – входная проводимость схемы со стороны 1 (рис. 1,з).

Коэффициенты (9) могут быть записаны через входное сопротивление при условии, что схемный минор D^Z не равен нулю. Формулы для нахождения коэффициентов вклада частичных токов в искомый ток совпадают с соответствующими формулами (9), а формула наложения частичных токов получается путем замены символа напряжения \underline{U} в левой и правой частях формулы (7) на символ тока \underline{I} . При этом в исходной схеме на рис. 1,а и измерительных схемах на рис. 1,б–з приемник напряжения \underline{U} заменяется на приемник тока \underline{I} .

Коэффициенты вклада частичных токов и напряжений для оценки влияния проводимости Y получаются также из формул (9) путем замены символа сопротивления Z на символ проводимости Y и взаимного переноса индексов у коэффициентов.

Коэффициенты вклада частичных откликов при выделении управляемых источников. Рассмотрим вывод формул, содержащих параметр источника напряжения, управляемого током (ИНУТ). Исходная схема с ИНУТ показана в таблице, где также приведены формулы и измерительные схемы для получения отклика путем наложения частичных откликов в схемах с управляемым источником.

Искомое напряжение может быть найдено на основе понятия определителя автономной схемы по аналогии с (3):

$$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \\ \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \end{array} \right| \cdot (10)$$

Выделив параметр ИНУТ в числителе и знаменателе (10) по формуле [6], получим:

$$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \\ \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \\ \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \end{array} \right|} \cdot (11)$$

Разделим и умножим каждое слагаемое числителя (11) на соответствующий схемный минор из знаменателя, поставив условие, что каждый из них отличен от нуля. В результате получим:

$$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = \frac{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \\ \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \\ \text{Circuit with current source } I \text{ and resistor } r \end{array} \right|} + \dots (12)$$

Первая и вторая дроби в числителе (12) – это напряжения $\underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r \otimes N}$ и $\underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r=0}$ на выходе схем, полученных из исходной схемы заменой на нулор и

нейтрализацией ИНУТ соответственно (см. таблицу). Учитывая это, запишем (12) в алгебраическом виде:

$$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = \frac{rD(r \otimes N)U_{\text{ВЫХ}}^{r \otimes N} + D(r=0)U_{\text{ВЫХ}}^{r=0}}{rD(r \otimes N) + D(r=0)}, (13)$$

где $D(r \otimes N)$ и $D(r=0)$ – схемные миноры, полученные из определителя исходной схемы путем замены на нулор и нейтрализации ИНУТ.

Из выражения (13) видно, что частичными напряжениями в схеме с ИНУТ являются напряжения $\underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r \otimes N}$ и $\underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r=0}$, которые могут быть вычислены или измерены в схемах таблицы. Коэффициенты их вклада в суммарное напряжение находятся путем сравнения формул (13) и (2) и представляются в виде:

$$k_1 = \frac{rD(r \otimes N)}{rD(r \otimes N) + D(r=0)}; (14)$$

$$k_2 = \frac{D(r=0)}{rD(r \otimes N) + D(r=0)}.$$

Формулы (14) записаны через схемные миноры и предназначены, как и формула (8), для получения искомого отклика расчетным путем. Для его экспериментального получения разделим числители и знаменатели (14) на определитель $D(r=0)$, предварительно поставив условие отличия его от нуля. Полученные формулы приведены в таблице, где $Y = D(r \otimes N) / D(r=0) = \underline{I} / \underline{E}$ – передаточная проводимость для схемы из таблицы.

Вывод формул наложения частичных откликов в схемах с другими управляемыми источниками (УИ) – источником тока, управляемым током (ИТУТ), источником напряжения, управляемым напряжением (ИНУН), и источником тока, управляемым напряжением (ИТУН) – аналогичен выводу формул для ИНУТ. Коэффициенты вклада частичных напряжений получаются для ИТУТ, ИНУН и ИТУН из формулы (14) путем замены коэффициента r на b , m и g , как показано в таблице, где B , K – коэффициенты передачи тока и напряжения, а Z – передаточное сопротивление.

Наложение частичных откликов при выделении нескольких элементов. Выведем формулу для случая размыкания и замыкания двух резисторов. Для этого рассмотрим схему на рис. 2,а.

Исходное схемно-алгебраическое выражение для искомого напряжения записывается аналогично выражению (3) для схемы с одним резистором:

$$\underline{U} = \left| \begin{array}{c} \text{Circuit with resistors } Z_1, Z_2 \\ \text{Circuit with resistors } Z_1, Z_2 \end{array} \right| \cdot (15)$$

№ п/п	Управляемый источник	Исходная схема	Измерительные схемы		
1	ИНУТ				
2	ИТУТ				
3	ИНУН				
4	ИТУН				

Путем последовательного выделения резисторов Z_1 и Z_2 из определителей числителя и знаменателя (15) и с помощью операций деления слагаемых числителя на схемные миноры из знаменателя получаем:

$$\underline{U} = k_1 U^{Z_1 Z_2} + k_2 U^{Z_1} + k_3 U^{Z_2} + k_4 U_{Z_1 Z_2}, \quad (16)$$

где коэффициенты вклада $k_1 = Z_1 Z_2 / S$; $k_2 = Z_1 Z_{\text{вх}2}^{Z_1} / S$; $k_3 = Z_2 Z_{\text{вх}1}^{Z_2} / S$; $k_4 = Z_{\text{вх}2}^{Z_1} Z_{\text{вх}1}(Z_2) / S$;

их знаменатель $S = Z_1 (Z_2 + Z_{\text{вх}2}^{Z_1}) +$

$+ Z_{\text{вх}1}^{Z_2} (Z_2 + Z_{\text{вх}2}(Z_1))$; входные сопротивления $Z_{\text{вх}2}^{Z_1}$, $Z_{\text{вх}1}^{Z_2}$, $Z_{\text{вх}1}(Z_2)$, $Z_{\text{вх}2}(Z_1)$ измеряются или рассчитываются по схемам на рис. 2, е–и.

Аналогично получаются формулы наложения откликов при других сочетаниях элементов. При n задействованных элементах формула будет содержать 2^n слагаемых. Общий вид формулы для наложения

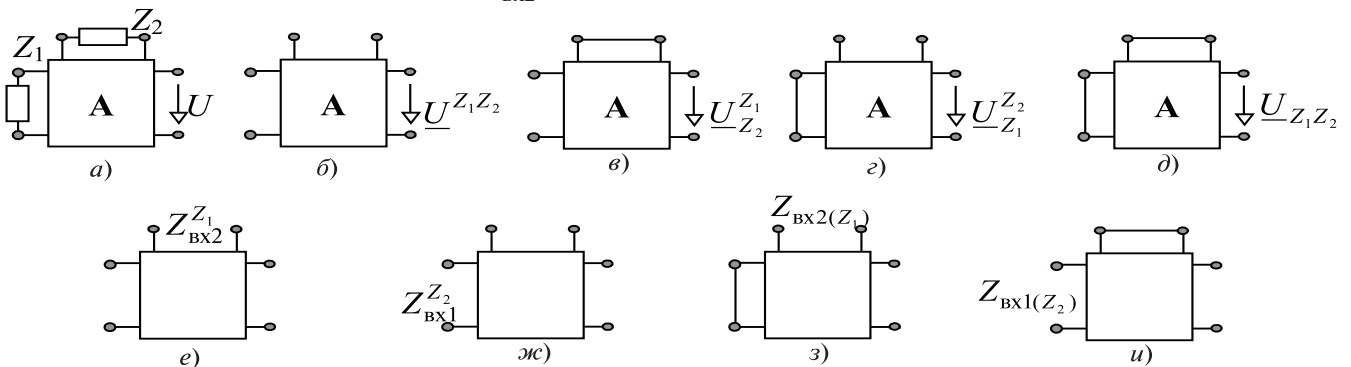


Рис. 2. Схема с двумя резисторами: исходная автономная схема (а); схемы (б), (в), (г), (д) – для измерения частичных напряжений $U^{Z_1 Z_2}$, U^{Z_1} , U^{Z_2} , $U_{Z_1 Z_2}$, и неавтономные схемы (е), (ж), (з), (и) – для измерения входных сопротивлений $Z_{\text{вх}2}^{Z_1}$, $Z_{\text{вх}1}^{Z_2}$, $Z_{\text{вх}2}(Z_1)$, $Z_{\text{вх}1}(Z_2)$

Формула наложения откликов	Коэффициенты вклада частичных откликов	Передаточная функция неавтономной схемы
$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = k_1 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r \oplus N} + k_2 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{r=0}$	$k_1 = \frac{rY}{rY+1}; k_2 = \frac{1}{rY+1}$	$Y = \frac{I}{E}$
$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = k_1 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{b \oplus N} + k_2 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{b=0}$	$k_1 = \frac{bB}{bB+1}; k_2 = \frac{1}{bB+1}$	$B = \frac{I}{J}$
$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = k_1 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{m \oplus N} + k_2 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{m=0}$	$k_1 = \frac{mK}{mK+1}; k_2 = \frac{1}{mK+1}$	$K = \frac{U}{E}$
$\underline{U}_{\text{ВЫХ}} = k_1 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{g \oplus N} + k_2 \underline{U}_{\text{ВЫХ}}^{g=0}$	$k_1 = \frac{gZ}{gZ+1}; k_2 = \frac{1}{gZ+1}$	$Z = \frac{U}{J}$

$$\underline{U} = \sum_{i=1}^{2^n} k_i U_i(P_i),$$

где i – номер сочетания состояния элементов; P_i – вектор состояния элементов размерностью n ; U_i – i -й частичный отклик; k_i – коэффициент вклада i -го отклика.

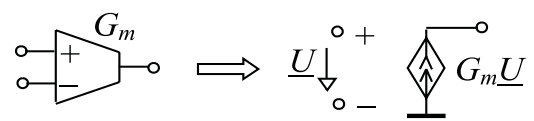
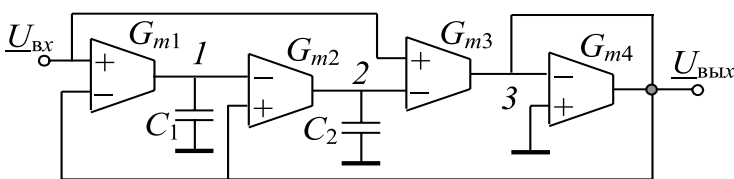
Пример вычисления коэффициента передачи активного фильтра с помощью обобщенного принципа наложения. Исходная схема фильтра на транскондуктивных усилителях (транскондукторах) приведена на рис. 3,а [8]. Транскондукторы моделируются источниками тока, управляемыми напряжением (рис. 3,б), с передаточными проводимостями $G_{m1} = G_{m2} = G_{m3} = G_{m4} = 200$ мкСм. Емкости конденсаторов $C_1 = 10$ пФ; $C_2 = 20$ пФ. Требуется найти численное значение коэффициента передачи фильтра при частоте $f = 1$ МГц.

Для вычисления значения коэффициента используется формула наложения частичных откликов при выделении ИТУН в строке 4 таблицы, которая для искомого коэффициента передачи напряжения при выделении, например ИТУН с параметром G_{m3} , записывается в виде

$$K = \frac{\underline{U}_{\text{ВЫХ}}}{\underline{U}_{\text{ВХ}}} = G_{m3} K^{G_{m3 \oplus N}} Z + K^{G_{m3=0}} / (G_{m3} Z + 1), \tag{17}$$

где $K^{G_{m3 \oplus N}}$ и $K^{G_{m3=0}}$ – частичные коэффициенты передачи напряжения в схемах, в которых ИТУН с параметром G_{m3} заменен на нулор и нейтрализован соответственно.

При замене ИТУН на нулор получается схема, представленная на рис. 4,а. Несмотря на то, что в этой схеме имеется три независимых узла, для нее из-за наличия нуллора достаточно составить два уравнения по методу узловых уравнений.



а)

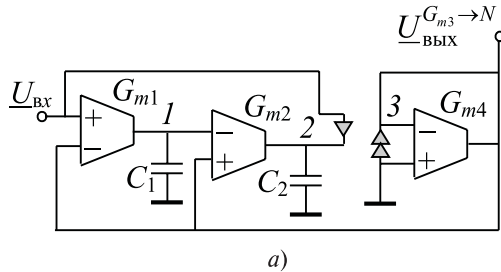
б)

Рис. 3. Активный фильтр на транскондукторах (а): цифрами 1, 2, 3 пронумерованы узлы, и схемная модель транскондуктора (б)

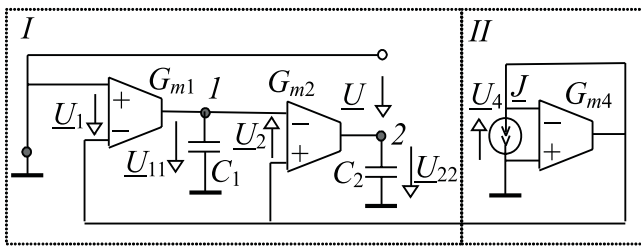
Узловые уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} pC_1 \underline{U}_{11} + G_{m1} \underline{U}_{33} &= G_{m1} U_{\text{вх}}; \\ G_{m2} \underline{U}_{11} - G_{m2} \underline{U}_{33} &= -pC_2 U_{\text{вх}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где \underline{U}_{11} и \underline{U}_{33} — напряжения узлов с номерами 1 и 3; $p = j\omega$ — комплексная частота.



а)



б)

Рис. 4. Схемы для нахождения частичного коэффициента $K^{G_{m3} \otimes N}$ (а) и передаточного сопротивления Z (б); I и II — подсхемы

Система уравнений (18) решается при заданных численных значениях параметров элементов и $U_{\text{вх}} = 1$ В методом исключения Гаусса. Полученное численное значение \underline{U}_{33} является искомым частичным коэффициентом:

$$K^{G_{m3} \otimes N} = 0,7657105946e^{-j0,30439957974} \quad (19)$$

Частичный коэффициент $K^{G_{m3} \otimes N}$ из формулы (17) равен нулю, поскольку в соответствующей схеме таблицы вход транскондуктора G_{m4} оказывается отключенным от НИ. Передаточное сопротивление Z находится из схемы на рис. 4, б, где \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_4 — управляющие напряжения для соответствующих ИТУН, а \underline{U}_{11} , \underline{U}_{22} — напряжения узлов 1 и 2.

Для анализа этой схемы не требуется составлять систему уравнений, поскольку подсхемы I и II оказались не связаны между собой по току из-за удаления ИТУН G_{m3} . Из подсхемы II следует, что $\underline{U}_4 = \underline{J} / G_{m4}$. С учетом $\underline{U}_1 = \underline{U}_4$ из подсхемы I получаем: $\underline{U}_{11} = G_{m1} \underline{U}_1 / (pC_1)$. Из второго закона Кирхгофа следует $\underline{U}_2 = -(\underline{U}_{11} + \underline{U}_4)$. Это напряжение является управляющим для ИТУН G_{m2} , поэтому $\underline{U} = -G_{m2} \underline{U}_2 / (pC_2)$. При единичном входном токе \underline{J} напряжение \underline{U} численно равно передаточному

сопротивлению. Для заданных параметров элементов оно принимает следующее значение:

$$Z = 26550,88758e^{-j2,837196856} \text{ Ом.} \quad (20)$$

Подставляя (19) и (20) в (17), получаем численное значение искомого коэффициента передачи напряжения:

$$K = 0,9312052535e^{-j0,3730906886}. \quad (21)$$

Для сравнения приведем соответствующий результат, полученный непосредственно решением системы уравнений, составленной для схемы на рис. 3 по методу узловых напряжений:

pC_1	0	G_{m1}	\underline{U}_{11}	\underline{U}_{11}	$G_{m1} \underline{U}_{\text{вх}}$
G_{m2}	pC_2	$-G_{m2}$	\underline{U}_{22}	\underline{U}_{22}	0
0	G_{m3}	G_{m4}	\underline{U}_{33}	\underline{U}_{33}	$G_{m3} \underline{U}_{\text{вх}}$

$$= \quad (22)$$

Значение \underline{U}_{33} , которое получается численным решением системы (22), при $U_{\text{вх}} = 1$ В совпадает с соответствующим значением (21), полученным с помощью обобщенного принципа наложения. При этом использование принципа наложения снижает трудоемкость расчета, поскольку требуется решение системы уравнений меньшей размерности, чем при непосредственном анализе цепи. При неоднократном применении формул обобщенного наложения трудоемкость численного расчета снижается более существенно за счет дальнейшего снижения размерности одновременно решаемой системы уравнений. В то же время обобщенный принцип наложения нецелесообразно использовать для получения единой символьной формулы отклика или передаточной функции, поскольку такой подход приводит к избыточному выражению, содержащему взаимно сокращающиеся множители.

Выводы. 1. Предложена общая формулировка принципа наложения, при котором частичные отклики суммируются с учетом коэффициентов вклада. В качестве элементов, порождающих частичные отклики, могут выступать не только независимые источники, но и любые линейные элементы.

2. Представленные экспериментальные и расчетные формулы для нахождения коэффициентов вклада резисторов и управляемых источников позволяют определить режим заданной схемы по режиму более простых подсхем при отсутствии одного, двух и более элементов. В последнем случае снижается трудоемкость расчета за счет уменьшения размерности одновременно решаемой системы уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зелях Э.В. Основы общей теории линейных электрических цепей. – М.: Изд. АН СССР, 1951.
2. Курганов С.А., Филаретов В.В. Неявный принцип наложения воздействий в линейных электрических цепях. – Электричество, 2005, № 4.
3. Коротков А.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами. – Электричество, 2009, № 4.
4. Filaretov V.V., Korotkov A.S. Generalized parameter extraction method in case of multiple excitation. – Proc. Of the 8th inter. Workshop on Symbolic Methods and Applications in Circuit Design. – Wroclaw, 23–24 September, 2004.
5. Feussner W. Ueber Stromverzweigung in netzformigen Leitern. – Annalen der Physik, 1902, Bd, № 13.
6. Филаретов В.В. Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров. – Электричество, 1998, № 5.
7. Халютин П., Титов А.А. Обобщенная симметричная формула метода эквивалентного генератора на основе разложения переменной (напряжения, тока) по слагаемым определителя. – Электричество, 2011, № 6.
8. Коротков А.С. Микроэлектронные аналоговые фильтры на преобразователях импеданса. – СПб: Наука, 1999.

[19.12.11]

Авторы: Курганов Сергей Александрович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне Ульяновский государственный технический университет – УГТУ). В 2006 г. защитил докторскую диссертацию «Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей» в Санкт-Петербургском государственном политехническом институте. Профессор, зам. заведующего кафедрой «Электроснабжение» УГТУ.

Филаретов Владимир Валентинович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода» в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.