

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДА ДИАГРАММ СВЯЗИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для математического моделирования в настоящее время характерна машинно-ориентированная формализация и автоматизация как самой постановки задачи, так и всех процедур, связанных с ее реализацией на ЭВМ [1,2]. Указанный подход требует разработки специализированного математического обеспечения, которое мы будем называть автоматизированным комплексом математического моделирования физико-технологических систем (ФТС). Основой построения автоматизированной системы комплекса математического моделирования является системный подход к анализу ФТС. Одним из приемов системного анализа этих процессов является их топологическое представление. Топологическая модель ФТС в форме диаграммы связи, во-первых, наглядно отражает структуру системы и, во-вторых, служит ее исчерпывающей количественной характеристикой [3-5].

Специфика объектов в металлургии, химической технологии, теплоэнергетике, представляемых как ФТС, оказывает существенное влияние на рабочий математический аппарат диаграмм связи и требует: разработки новых элементов, процедур и понятий; обоснования специфических диаграммных фрагментов типичных подсистем ФТС; определения новых типов структур слияния, отражающих характер совмещения потоков субстанций в локальной точке пространства; введения новых понятий

локальных и глобальных диаграмм связи и т.п.

В рамках решения этих задач авторы представляемой работы предлагают обобщить методы теории цепей таким образом, чтобы использовать элементную базу этой теории для создания новых базовых элементов диаграмм связи. Л.О.Шуа заметил [6], что мы, возможно, даем слишком ограниченную физическую интерпретацию элементов, так как все они в конце концов лишь математические объекты. В поле этих концепций нами предложены новые элементы диаграмм связи: нуллятор, норатор и их комбинация – нулдор, которые вместе с элементами R, L, C, M могут быть применены в качестве базовых элементов для составления диаграмм связи физико-технологических систем, использующих механическую, тепловую, электрическую, химическую, ядерную энергию.

Рассмотрим свойства вновь вводимых элементов и методы анализа диаграмм связи, содержащих эти элементы.

Нуллятор («нулевой» элемент) – односвязный энергетический элемент, характеризуется наличием единственной связи с окружающей средой. Этот элемент описывается одной парой обобщенных переменных – усилия E и потока F, у которого обобщенное усилие и обобщенный поток тождественно равны нулю. Обозначение нуллятора – NU. Его характеризует свойство одновременного равенства нулю как E, так и F.

Норатор («свободный» элемент) – одно-

единственную связь с окружающей средой. Этот элемент описывается одной парой обобщенных переменных – усилия E и потока F, обобщенное усилие и обобщенный поток которого не определены (могут принимать произвольные значения).

Второму элементу – норатору – обозначение которого – NO, приписывается следующее свойство: F и E могут принимать любые (произвольные) значения, независимо один от другого.

Это необычные односвязные энергетические элементы. Их особенность можно представить с помощью матрицы Q, определяемой в общем случае для многосвязного элемента с n связями из следующего уравнения:

$$\begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} = Q \cdot a, \quad (1)$$

где E, F – n-мерные векторы обобщенных усилий и потоков многосвязного элемента;  
a – вектор комплексных множителей.

В частном случае для «обычного» односвязного элемента, характеризующегося входным сопротивлением R или входной проводимостью Y, справедливы уравнения

$$\begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} F, \quad \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} E, \quad (2)$$

и, следовательно, в этом случае

$$Q = \begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} \text{ или } Q = \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} \quad (3)$$

В отличие от обычного односвязного элемента нуллятор характеризуется матрицей

$$Q_{NU} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а норатор

$$Q_{NO} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Сравнение формул (4-5) и (3) показывает, что нуллятор нельзя представить как предельный случай «обычного» односвязного элемента: ни при каком изменении параметров «обычного» односвязного элемента из матриц (3) нельзя

получить матрицу (4) или (5).

Нуллятор – пассивный элемент без потерь (EF=0), а норатор – активный и невязимый односвязный элемент.

Для того, чтобы диаграммы связи, содержащие указанные элементы, соответствовали реальным процессам, цепям, и т.д., оба элемента должны входить в них попарно, так что число нулторов должно равняться числу нораторов.

Из рассмотренных необычных односвязных энергетических элементов можно образовать двухсвязный элемент, у которого одна связь – обобщенное усилие E = 0 и обобщенный поток F = 0, а другая связь – обобщенные переменные усилие E и поток F не определены. Такой двухсвязный энергетический элемент назван нултором и может быть как уравновешенным (рис.1 а, б) так и заземленным (рис. 2 а, б).

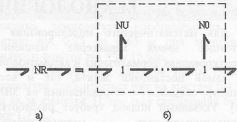


Рис.1. Диаграммное представление уравновешенного нултора

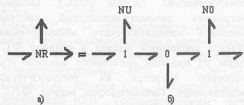


Рис. 2. Диаграммное представление заземленного нултора

Для нултора справедливо уравнение

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

при этом нултор имеет матрицу

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

У нуллора не существует иммитансных матриц  $z$ ,  $y$  и матрицы рассеяния  $S$ .

Следует отметить, что нулор может рассматриваться как предельный случай «обычного» двухсвязного элемента, описываемого коэффициентами  $A, B, C$ , и  $D$ , в отличие от отдельно взятых нуллатора и норатора, если при изменении параметров

$$\lim A = \lim B = \lim C = \lim D = 0$$

Это очевидно, если учесть, что уравнение

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ -F_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

эквивалентно уравнению

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ 1 & 0 \\ C & -D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Нулор — активный невзаимный двухсвязный элемент.

Понятие «нулор» может широко использоваться при исследовании активных ФТС. Нулор является обобщенным названием двух гипотетичных односвязных элементов (нуллатора и норатора), каждый из которых обладает свойствами, не встречающимися у ФТС. При совместном рассмотрении нуллатора и норатора с добавлением к ним пассивных элементов они могут передавать главные свойства ФТС. Приведем диаграммы связи с нуллорами для некоторых активных ФТС.

На рис. 3а - 3г изображены схемы идеальных усилителей или управляемых источников и их диаграммы связи.

1. Идеальный усилитель тока, управляемый напряжением входа (УТУН), у которого ток на выходе  $I_2 = K_y U_1$  пропорционален напряжению входа. Параметры проводимости усилителя

$$R_{21}^{-1} = Y_{21} = K_y$$

Входное сопротивление усилителя бесконечно велико; выходное сопротивление усилителя, определяемое со стороны выхода при  $U_1=0$ , также бесконечно велико (рис. 3 а).

2. Идеальный усилитель напряжения, управляемый током входа (УНУТ), у которого напряжение на выходе  $U_2 = K_z I_1$  пропорционально току входа, является дуальным предыдущему усилителю. Параметры сопротивления усилителя  $R_{21} = Z_{21} = K_z$ . Его входное и выходное сопротивления равны нулю (рис.3 б).

3. Идеальный усилитель напряжения, управляемый напряжением (УНУН), у которого напряжение на выходе  $U_2 = K_g U_1$  пропорционально напряжению входа,  $g$ -параметры усилителя:  $g_{21} = K_g$ . Входное сопротивление усилителя велико, а его выходное сопротивление равно нулю (рис.3 в).

4. Идеальный усилитель тока, управляемый током входа (УТУТ), у которого ток выхода  $I_2 = K_h I_1$  пропорционален току входа. Смешанные параметры усилителя:  $h_{21} = K_h$ . Входное сопротивление равно нулю, а выходное бесконечно велико (рис.3 г).

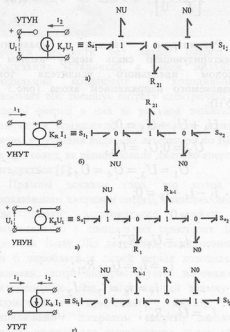


Рис. 3. Схемы идеальных усилителей и их диаграммы связи:

- а) УТУН;
- б) УНУТ;
- в) УНУН;
- г) УТУТ.

Идеальные усилители являются строго односторонне направленными трехполюсными элементами – передача сигнала происходит только от входа к выходу, обратной передачи сигнала нет.

Функцию передачи усилителя, т.е. отношение изображений выходной и входной величин, называют коэффициентом усиления; его значение для идеального усилителя вещественно:

$$a = \frac{F_2}{F_1} = K$$

Для четырех типов усилителей размерности  $F_2$  и  $F_1$  и, следовательно, коэффициенты усиления будут различными: величина  $a$  будет соответственно принимать значения параметров  $Y_{21}$ ,  $Z_{21}$ ,  $h_{21}$  и  $g_{21}$ . Остальные параметры матриц идеальных усилителей будут равны нулю, так что все четыре матрицы указанных типов усилителей могут быть записаны в следующем обобщенном виде:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Рассмотрим вывод уравнения, характеризующего связь между входом и выходом идеального усилителя тока, управляемого напряжением входа (рис.3 а, УТУН):

$$\begin{aligned} U_1 + U_2 + U_3 &= 0; \\ U_3 &= 0; U_1 = U_3; \\ U_1 &= U_3 = U_4 = U_5; \\ i_3 - i_4 + i_5 &= 0; \\ i_3 &= 0; \\ i_4 &= U_1 \cdot R_{21}^{-1}; \\ i_4 &= i_5 = U_1 \cdot R_{21}^{-1}; \\ i_5 &= i_6 = i_7 = I_2 \\ I_2 &= U_1 \cdot R_{21}^{-1}; \\ I_2 &= U_1 \cdot Y_{21} \\ I_2 &= K_y \cdot U_1; \\ I_2 &= K_y \cdot U_1 \end{aligned}$$

Покажем примеры диаграмм связей

объектов с использованием введенных элементов.

1. Транзисторный (с общим эмиттером) низкочастотный усилитель (рис.4).

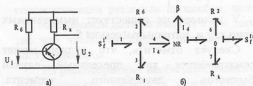


Рис. 4. Схема транзисторного низкочастотного усилителя (а) и его диаграмма связи (б)

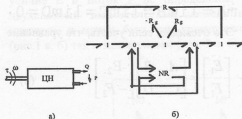


Рис. 5 Центробежный насос (ЦН):  
а) схема ЦН;  
б) диаграмма связи центробежного насоса на базе нуллора

### Выводы

1. Предложены новые элементы – нуллаторы, нораторы и нуллоры, позволяющие достаточно просто моделировать различные ФТС.
2. Введены основные формальные математические системы определений и символов.
3. Наименования дескрипторов определены в терминах, связанных с энергией и мощностью.
4. Построены диаграммы связи типовых идеальных усилителей, управляемых широким классом ФТС.
5. В качестве примеров разработаны диаграммы связи ФТС с использованием нуллаторов, нораторов и нуллоров, при этом преимущество моделей в виде диаграмм связи вытекает из следующих свойств:
  - а) диаграмма связи однозначно описывает структуру ФТС;
  - б) на основании данной диаграммы связи достаточно просто записываются канонические уравнения;
  - в) легко кодируются физические свойства и причинная зависимость между

переменными, а также приводится вид функциональной зависимости для основных связей.

### Литература

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.– М.: Наука, 1976.– 496 с.
2. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии. *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* - Днепропетровск: НМетАУ.- 2001.- Т.3.- С.20-26.
3. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксерго-диссипативная функция как основа топологоексергетического подхода анализа физико-технологических систем. *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* - Днепропетровск: НМетАУ.-2002.- Т.5.-С.67-71.
4. Тучин В.Т., Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Белоус А.И. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи.// *Доклады АН СССР.* –1979.-Т. 244, №3 , С.133-136.
5. Долгополов И.С. Топологический метод моделирования гидродинамики аппарата вихревого псевдооживленного слоя // *Математическое моделирование.*–2001.- № 2(7).- С. 40-44
6. Chua L. Memristor - The Missing Circuit Element. // *IEEE. Transactions on Circuit Theory.*- 1971.-№9.-P.507- 519.