

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Элементная база топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) (Часть 1)

И.С. ДОЛГОПОЛОВ, В.Т. ТУЧИН

Днепродзержинский государственный технический университет

Розглянуто принципи формування елементної бази топологоексергетичного методу, що відображають його основну концепцію. Представлено топологоексергетичні й аналітичні описи однозв'язних елементів - дисипаторів ексергії, накопичувачів і джерел (стоків) субстанції та ексергетичних мемрісторів. Приведено топологічні й аналітичні описи двозв'язаних елементів - ексергетичних трансформатора, гіратора, неідеального провідника і їхні модульовані версії.

Рассмотрены принципы формирования элементной базы топологоэксергетического метода, отражающие его основную концепцию. Представлены топологоэксергетические и аналитические описания односвязных элементов - диссипаторов эксергии, накопителей и источников (стоков) субстанции и эксергетических мемристоров. Приведены топологические и аналитические описания двухсвязных элементов - эксергетических трансформатора, гиратора, неидеального проводника и их модулированные версии.

The principles of formation of element base of a topologoexergycal method are reviewed that reflecting its basic concept. Topologoexergycal and analytical descriptions of simple connected members - dissipators of an exergy, storages and sources of a substance and exergycal memristors are submitted. The topologoexergycal and analytical descriptions of two-bonds elements - exergycal transformer, gyrator, imperfect conductor and their modulated versions are adduced.

Эффективное решение задач энергосбережения путем разработки и совершенствования современных технологий и оборудования возможно осуществить при дальнейшем развитии теоретической базы и инженерных методов анализа в этой области.

В последние десятилетия развивается эксергетический метод анализа технических систем [1-2], основанный на применении принципов термодинамики и элементов экономического анализа для оценки энергопотребления. Этот метод дает возможность описать энергетические взаимосвязи различных видов энергии в рассматриваемых технологических системах только лишь с позиций анализа их эксергетических к.п.д. При этом указанный метод позволяет описывать поведение рассматриваемых систем в динамике только для простых случаев (неразвитых топологических структур).

Современным методом исследования и проектирования сложных технических объектов является системный анализ, одним из мощных средств которого есть топологический (диаграмм связи) метод описания физико-химических систем (ФХС) [3, 4].

Стратегия системного подхода в энергосбережении – это принципы достижения конечной цели исследований и разработок – создания высокоэффективных энергосберегающих физико-технологических систем. Данная стратегия отражена в разрабатываемом нами топологоэксергетическом методе анализа физико-технологических систем (ФТС), который объединяет достоинства эксергетического и топологического (диаграмм связи) методов [5-9].

Специфика объектов в металлургии, химической технологии, теплотехнике, представляемых как ФТС, оказывает существенное влияние на рабочий математический аппарат топологоэксергетических структур связи и требует:

- 1) разработки новых элементов, процедур и понятий;
- 2) обоснования специфических диаграммных фрагментов типичных подсистем ФТС;
- 3) определения новых типов структур слияния и разделения, отражающих характер совмещения и разделения потоков субстанций в локальной точке пространства и в объеме;
- 4) введения новых понятий локальных и глобальных топологоэксергетических структур связи и т.п.

Формализм топологоэксергетического метода предполагает создание системы структур, обеспечивающих получение исчерпывающих характеристик энергопотребления конкретных физико-технологических систем в виде математического описания. Эта система структур должна содержать следующие компоненты:

- а) систему обобщенных переменных;
- б) элементную базу, включающую новые элементы топологоэксергетического метода;
- в) структуры слияния и разделения потоков;
- г) систему формализации процедур метода.

В работе [9] нами предложена система обобщенных переменных топологоэксергетического метода.

Целью статьи является представление элементной базы топологоэксергетического метода, которая должна отвечать следующим требованиям:

- 1) отражать физико-химические особенности элементарных структур ФТС;
- 2) обеспечивать возможность получения формализованной процедуры моделирования, анализа и решения задач энергосбережения;
- 3) представлять эмерджентные свойства ФТС и отражать её интерэктность;
- 4) обеспечивать возможность решения задач анализа устойчивости, управляемости, чувствительности, надежности и помехозащищенности физико-технологических систем.

Топологоэксергетический принцип моделирования ФТС развивает эксергетическую ветвь метода диаграмм связи, поэтому в структуре элементной базы разрабатываемого метода используется топологический подход к классификации элементов с отражением их эксергетического аспекта.

Классификация элементов, описывающих физико-технологические системы, осуществляется по двум признакам:

- 1) на основе их физико-химической природы;
- 2) по количеству связей элементов.

При этом ФТС могут быть представлены объектами как с сосредоточенными так и с распределенными параметрами.

В статье предлагаются новые элементы, которые используются в топологоэксергетическом методе: эксергетические мемристоры, эксергетические мутаторы, нуллаторы, нораторы и нуллоры.

Структуру элементной базы с сосредоточенными параметрами отобразим в виде следующих групп:

- 1) диссипаторы эксергии;
- 2) накопители эксергии;
- 3) источники (стоки) эксергии;
- 4) преобразователи эксергии;
- 5) передатчики эксергии с перекрестной связью обобщенных эксергетических усилий и потоков;
- 6) элементы структур слияния и разделения эксергетических потоков.

Приведенная структура элементной базы позволяет характеризовать ФТС функциональными отношениями и связями между собой и внешней средой. В со-

ответствии с этим все элементы подразделяются на односвязные, двухсвязные и многосвязные (n-связные).

Односвязные элементы

1а. Диссипаторы эксергии

Диссипатор эксергии (R_3 -элемент) определяется в линейной форме и в нелинейной форме из уравнений:

$$e^3 = R_3 \cdot f \text{ или } f = R_3^{-1} \cdot e^3, \quad (1)$$

$$e^3 = F_{R_3} \cdot f \text{ или } f = F_{R_3}^{-1} \cdot e^3 \quad (2)$$

где e^3 – обобщенное эксергетическое усилие; f – обобщенный поток; R_3 – линейный диссипатор эксергии; F_{R_3} – нелинейный диссипатор эксергии.

Диссипируемая эксергетическая мощность \dot{D} определяется по уравнению (3) в случае линейного диссипатора эксергии и (3а), если диссипатор эксергии нелинейный

$$\dot{D} = R_3 \cdot f^2 \quad (3)$$

$$\dot{D} = F_{R_3} \cdot f^2 \quad (3a)$$

В элементной базе метода диаграмм связи содержится элементарный диссипатор энергии – односвязный R-элемент. В статье приводятся топологическое обозначение диссипатора энергии и его аналитическое описание с целью демонстрации как общих черт в характеристиках диссипаторов эксергии и энергии, так и их различий.

Рассеянная энергетическая мощность P_d потока определяется по зависимости (4), если диссипатор линейный, при нелинейном диссипаторе энергии - по зависимости (4а) :

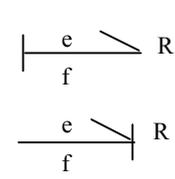
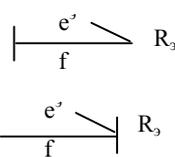
$$P_d = R \cdot f^2, \quad (4)$$

$$P_d = F_R \cdot f^2, \quad (4a)$$

где R- линейный диссипатор энергии; F_R - нелинейный диссипатор энергии.

Топологические символы диссипаторов энергии и эксергии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Топологические символы диссипаторов энергии и эксергии

Диаграммный символ при анализе ФТС	Функциональная связь между элементами	
	Линейная	Нелинейная
При энергетическом анализе 	$e = Rf$ $f = \frac{e}{R}$	$e = F_R(f)$ $f = F_R^{-1}(e)$
При эксергетическом анализе 	$e^3 = R_3 f$ $f = \frac{e^3}{R_3}$	$e^3 = F_{R_3}(f)$ $f = F_{R_3}^{-1}(e^3)$

В таблице 2 представлены аналитические зависимости для определений диссипаторов и значений

потерь энергии и эксергии различных ФТС, обусловленные их диссипативными свойствами.

Таблица 2. Аналитические выражения R-свойств диссипаторов в топологэксергетическом методе

Вид энергии	Аналитическое выражение R-свойств		Рассеянная мощность на R-элементе	
	ЭА	ЭКСА	ЭА	ЭКСА
Механическая: – при работе сил вязких напряжений – при поступательном движении – при вращательном движении		$R_{\tau} = \frac{\tau^{ql}}{e_{\alpha\beta}}$ $R_{мп} = R_{мп}^{\circ} = \frac{\Delta F}{v}$ $R_{мв} = R_{мв}^{\circ} = \frac{\Delta M}{\omega}$	$P_{dм} = \dot{D}_{м} = R_{\tau} \cdot e_{\alpha\beta}^2$ $P_{dмп} = \dot{D}_{мп} = R_{мп} \cdot v^2 = \Delta F \cdot v$ $P_{dмв} = \dot{D}_{мв} = R_{мв} \cdot \omega^2 = \Delta M \cdot \omega$	
Гидравлическая – при перемещении жидких и газообразных сред по каналам		$F_{R_{\Gamma}}(\dot{V}) = \frac{\Delta P}{\dot{V}}$	$P_{dr} = \dot{D}_{\Gamma} = F_{R_{\Gamma}}(\dot{V}) \cdot \dot{V}^2 = \Delta P \cdot \dot{V}$	
Электрическая – при прохождении электрического тока через активное сопротивление		$R_{эл} = \frac{\Delta U}{I}$	$P_{dэл} = \dot{D}_{эл} = R_{эл} \cdot I^2 = \Delta U \cdot I$	
Тепловая -при конвективном потоке -при кондуктивном потоке – при излучении	$R_{T} = \frac{T}{\dot{S}}$	$R_{к} = \frac{\Delta e_{к}^{\circ}}{\dot{m}}$ $R_{КТ} = \frac{T_0(T_1 - T_2)}{T_1 T_2 \dot{Q}_T}$ $R_{u} = \frac{T_0 T_{\phi}}{\dot{Q}_u}$	$P_{dT} = T \cdot (\dot{S})$	$\dot{D}_{к} = R_{к} \cdot \dot{m}^2 = \Delta e_{к}^{\circ} \cdot \dot{m}$ $\dot{D}_{КТ} = R_{КТ} \cdot \dot{Q}_T^2 = \frac{T_0(T_1 - T_2)}{T_1 \cdot T_2} \cdot \dot{Q}_T$ $\dot{D}_u = R_u \cdot \dot{Q}_u^2 = T_0 \cdot T_{\phi} \cdot \dot{Q}_u$
Химическая – энергия химической реакции	$R_{x} = \frac{B_{\Gamma}}{I_{\Gamma}}$	$R_x^{\circ} = \frac{(e_1^x + e_2^x) - e_3^x}{\dot{m}^x}$	$P_{dx} = B_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma}$	$\dot{D}_x = R_x^{\circ} \cdot (\dot{m}^x)^2$

Обозначения в таблице 2:

ЭА-при энергетическом анализе; ЭКСА- при эксергетическом анализе;

R_{τ} - диссипатор, отражающий действие вязких свойств среды; τ^{ql} – компоненты тензора вязких напряжений; $e_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора скоростей деформации; $R_{мп}$ – диссипатор, отражающий действие сил трения скольжения; ΔF - изменение обобщенного усилия – механической силы - вследствие трения скольжения; v - скорость; $R_{мв}$ – диссипатор, отражающий действие сил трения качения; ΔM - изменение обобщенного усилия – крутящего момента - вследствие трения качения; ω - угловая скорость; ΔP – разность давлений; \dot{V} – объемный расход; $F_{R_{\Gamma}}(\dot{V})$ – нелинейный диссипатор гидравлической энергии как функция объемного расхода; $R_{эл}$ – диссипатор электрической энергии; ΔU – падение электрического напряжения; I – электрический ток; R_T – диссипатор, характеризующий потери тепловой энергии

в процессе теплопередачи; $R_{к}$ – диссипатор, характеризующий потери эксергии при передаче теплоты конвекцией; $\Delta e_{к}^{\circ}$ – изменение удельной эксергии конвективного потока; \dot{m} – массовый расход; $R_{КТ}$ – диссипатор, характеризующий потери эксергии при передаче теплоты теплопроводностью; T_0 – температура окружающей среды; T – температура источника теплоты; T_1 и T_2 -температуры наружной и внутренней поверхностей рассматриваемого элемента ФТС; \dot{Q}_T – кондуктивный тепловой поток; R_u – диссипатор, характеризующий потери эксергии при передаче тепловой энергии излучением; T_{ϕ} – температурный фактор [9]; \dot{Q}_u – тепловой поток излучения; \dot{S} – поток энтропии; R_x – отражающий потери энергии в химической реакции; R_x° – диссипатор, отражающий потери эксергии при химической реакции; B_{Γ} – сродство химической реакции; I_{Γ} –

скорость химической реакции; e_1^x, e_2^x – химические эксергии веществ 1 и 2, участвующих в реакции; e_3^x – химическая эксергия вещества, образовавшегося в результате реакции; \dot{m}^x – массовый расход вещества, образовавшегося в результате химической реакции; P_{dm} – рассеянная мощность механической энергии, обусловленная действием сил вязких напряжений в потоке вещества; $P_{dмп}$ – рассеянная мощность механической энергии, обусловленная действием сил трения скольжения при перемещении потока; $P_{dмв}$ – рассеянная мощность механической энергии, обусловленная действием сил трения качения при перемещении объекта; \dot{D}_m – диссипируемая эксергетическая мощность механической энергии, обусловленная действием сил вязких напряжений в потоке вещества; $\dot{D}_{мп}$ – диссипируемая эксергетическая мощность механической энергии, обусловленная действием сил трения скольжения при перемещении потока; $\dot{D}_{мв}$ – диссипируемая эксергетическая мощность механической энергии, обусловленная действием сил трения качения при перемещении объекта; $P_{дг}$ – рассеянная мощность гидравлической энергии, обусловленная гидравлическими сопротивлениями; $\dot{D}_г$ – диссипируемая эксергетическая мощность гидравлической энергии, обусловленная гидравлическими сопротивлениями; $P_{дэл}$ – рассеянная мощность электрической энергии, обусловленная прохождением электрической энергии через электрический резистор; $\dot{D}_{эл}$ – диссипируемая эксергетическая мощность электрической энергии, обусловленная прохождением электрического тока через резистор; $P_{дт}$ – рассеянная мощность тепловой энергии, обусловленная изменением энтропии тепловой системы; $\dot{D}_к$ – конвективного теплового потока, обусловленная необратимыми потерями термомеханической энергии; $\dot{D}_{КТ}$ – диссипируемая эксергетическая мощность кондуктивного теплового потока, обусловленная теплопередачей при конечной разности температур; $\dot{D}_у$ – теплового потока излучения, обусловленная теплопередачей при конечной разности температур; P_x – рассеянная мощность химической энергии, обусловленная необратимыми потерями химического потенциала в процессе реакции; $\dot{D}_у$ – диссипируемая эксергетическая мощность химической энергии, обусловленная необратимыми потерями химического потенциала в процессе реакции.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что R-свойства в топологэксергетическом представлении позволяют отразить диссипативные особенности физико-технологической системы с учетом влияния на них параметров окружающей среды и технологических параметров ФТС.

16. Эксергетический мемристор

Эксергетический мемристор – M_3 -элемент – диссипатор эксергии, управляемый по заряду или по импульсу.

В топологэксергетическом методе используются два варианта представления эксергетического мемристора – интегральная и дифференциальная.

Определяющие соотношения для эксергетического мемристора в интегральной форме могут быть записаны в виде:

$$p^3 = \Psi_{m3}(q), \quad (5)$$

$$q = \Psi_{m3}^{-1}(p^3), \quad (6)$$

где p^3 – обобщенный эксергетический импульс; $\Psi_{m3}(q)$ – нелинейное интегральное эксергетическое сопротивление – мемристор, управляемый по заряду; q – обобщенный заряд; $\Psi_{m3}^{-1}(p^3)$ – величина, обратная Ψ_{m3} , нелинейная интегральная эксергетическая проводимость мемристора.

Аналитическая форма обобщенного эксергетического импульса $p_3(t)$ представлена уравнением

$$p^3(t) = \int_0^t e^3(\tau) d\tau + p^3(0), \quad (7)$$

где $e^3(\tau)$ – обобщенное эксергетическое усилие, функция времени τ ; $p^3(0)$ – значение обобщенного эксергетического импульса при $\tau=0$.

Обобщенный заряд $q(t)$ в аналитической форме может быть представлен уравнением

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau + q(0), \quad (8)$$

где $f(\tau)$ – обобщенный поток, функция времени τ .

В дифференциальной форме определяющие соотношения для эксергетического мемристора получим из уравнений (5) и (6):

$$\frac{dp^3}{dt} = \Psi'_{m3}(q) \frac{dq}{dt}, \quad (9)$$

$$\frac{dq}{dt} = \left[\Psi_{m3}^{-1} \right] (p^3) \frac{dp^3}{dt}. \quad (10)$$

Учитывая, что $\frac{dp^3}{dt} = e^3$ и $\frac{dq}{dt} = f$, преобразуем уравнения (9) и (10) с учетом традиционных обозначений.

Обозначим $\Psi'_{m3}(q) = M_3(q)$, а

$$\left[\Psi_{m3}^{-1} \right] (p^3) = W_3(p^3).$$

Подставим эти значения в (9) и (10) и получим

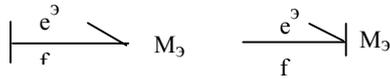
$$e^3 = M_3(q) f, \quad (11)$$

$$f = W_3(p^3) e^3. \quad (12)$$

В уравнениях (11) и (12) $W_3(q)$ – величина, обратная переменному эксергетическому “сопротивлению” мемристора $M_3(q)$, т.е. его переменная эксергетическая “проводимость”.

Если характеристика элемента $M_3(q)$ линейна, то, $M_3(q) = \text{const}$, эксергетический мемристор представляет линейный эксергетический R_3 -элемент, характеристики которого рассмотрены в разделе 1а этой статьи.

Топологэксергетический символ эксергетического мемристора имеет вид:



2. Консервативные накапливающие и инерционные односвязные эксергетические элементы

При разработке аналитического описания накапливающих и инерционных эксергетических элементов последние отражают их эксергетические особенности каждого вида энергии, используемого при реализации топологэксергетического формализма ФТС.

Математическое описание элементов накопления эксергии отражает способность системы в течение некоторого времени совершать работу

$$A = \int e^3(t)f(t)dt \tag{13}$$

Поэтому элементы, характеризующие эту способность, имеют эксергетический смысл.

Выделив в (13) составляющие, отражающие обобщенный заряд, получим:

$$A = \int e^3(q)dq \tag{14}$$

Элемент, который характеризуется формой накопления, представленной (14), является емкостным накапливающим эксергетическим элементом. Его свойства описаны в таблице 3.

Если в (13) использовать составляющие, отражающие обобщенный импульс, то это выражение примет вид:

$$A = \int f(p^3)dp^3 \tag{15}$$

Этот элемент имеет инерционную природу накопления, является инерционным эксергетическим элементом. Его аналитическая форма представлена в таблице 3.

Эксергия E , накопленная односвязными аккумулялирующими элементами, может быть представлена с помощью уравнений вида

$$E = \int e^3 f dt \tag{16}$$

Эксергетическая мощность, аккумулируемая в этих элементах представлена уравнениями вида

$$P = e^3 \cdot f \tag{17}$$

Таблица 3. Односвязные накапливающие и инерционные топологэксергетические структуры

Элемент	Топологэксергетический символ	Аналитическая форма выражения			
		Линейная	Нелинейная	Накопленная эксергия для линейных элементов	Мощность, аккумулируемая в линейных элементах
Эксергетическая емкость C_3 -элемент		$f = C_3 \frac{de^3}{dt}$ $e^3 = C_3^{-1}q$	$f = \frac{d}{dt} [\psi_{C_3}(e)]$ $e^3 = \psi_{C_3}^{-1}(q)$	$E = \frac{1}{2} C_3 e_3^2 = \frac{1}{2C} q^2$	$P = e^3 C_3 \frac{de^3}{dt} = q \frac{dq}{dt}$
Эксергетическая инерционность I_3 -элемент		$e^3 = I_3 \frac{df}{dt}$ $f = I_3^{-1}p^3$	$e^3 = \frac{d}{dt} [\psi_{I_3}(f)]$ $f = \psi_{I_3}^{-1}(p^3)$	$E = \frac{1}{2} I_3 f^2 = \frac{1}{2I_3} (p^3)^2$	$P = I_3 f \frac{df}{dt} = p^3 \frac{dp^3}{dt}$

3. Элементы источников (стоков) субстанций

В топологэксергетическом анализе используем 3 типа элементов – источников (стоков) субстанции, отражающих энергетическое, силовое воздействие или воздействие материального потока на ФТС. Соответственно этим понятиям в топологэксергетическом методе соответствуют элементы, отражающие источники (стоки) обобщенного эксергетического усилия и потока. Обозначение источников (стоков) следующее: источник (стоки) обобщенного эксергетического усилия – S_e^3 ,

источников (стоков) обобщенного потока – S_f , источников (стоков) обобщенного эксергетического усилия и потока – S_{ef}^3 .

Диagramмные символы и аналитические выражения источников (стоков) субстанции в топологэксергетическом методе представлены в таблице 4.

Элементы источников (стоков) субстанций при построении топологэксергетических структур связи ФТС выполняют роль генераторов причинности, обусловленную физическим смыслом этих элементов.

В каждой конкретной ФТС элементы источников (стоков) могут быть представлены, как правило, самостоятельной топологоэксергетической структурой связи.

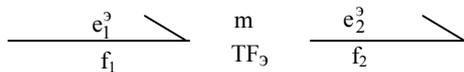
Таблица 4. Топологические символы источников (стоков) субстанции в топологоэксергетическом методе

Диаграммный символ	Функциональная связь между элементами	
	Линейная	Нелинейная
	$e^3 = E^3; (f - \text{произвольная})$	$e^3 = E^3(t); (f - \text{произвольная})$
	$f = F; (e^3 - \text{произвольная})$	$f = F(t); (e^3 - \text{произвольная})$
	$e^3 = E^3; f = F$	$e^3 = E^3(t); f = F(t)$
	$e^3 = -E^3; (f - \text{произвольная})$	$e^3 = -E^3(t); (f - \text{произвольная})$
	$f = -F; (e^3 - \text{произвольная})$	$f = -F; (e^3 - \text{произвольная})$
	$e^3 = -E^3; f = -F$	$e^3 = -E^3(t); f = -F(t)$

3а. Идеальные двухсвязные элементы и неидеальный двусвязный преобразователь

Для отражения преобразования и передачи эксергии (энергии, мощности) в топологоэксергетическом анализе используем два идеальных двухсвязных элемента эксергетические трансформатор и гиратор. Оба этих элемента обеспечивают сохранение мощности, т.е. $P_1 = P_2$.

Эксергетический трансформатор обозначают:

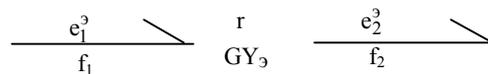


Аналитически определяется как

$$\begin{aligned} e_1^3 \cdot f_1 &= e_2^3 \cdot f_2 \\ e_1^3 &= m \cdot e_2^3 \\ f_1 &= \frac{1}{m} \cdot f_2 \end{aligned} \tag{18}$$

где m – коэффициент трансформации (модуль трансформатора).

Эксергетический гиратор обозначается



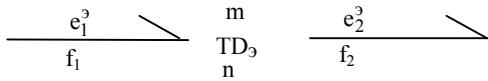
и определяется аналитически как

$$\begin{aligned} e_1^3 &= r \cdot f_2 \\ e_2^3 &= r \cdot f_1 \end{aligned} \tag{19}$$

где r – коэффициент гирации (модуль гиратора).

В топологоэксергетическом методе применяется и неидеальный проводник или неидеальный преобразователь субстанции, допускающий потери субстанции, в том числе и эксергии при передаче (TD_3 - элемент). У этого элемента передаточные числа по обобщенным переменным разные. Для этого элемента закон сохранения передаваемой субстанцией мощности может и не соблюдаться. TD_3 - элемент применяют при описании химических процессов, в которых в результате реакций происходит изменение как обобщенных эксергетических усилий, так и обобщенных потоков с разными передаточными числами. Условное обозначение TD_3 -

элемента и его аналитическая характеристика имеют вид:



Аналитически определяется как

$$\begin{aligned} n \cdot e_1^3 \cdot f_1 &= m \cdot e_2^3 \cdot f_2, \\ e_1^3 &= m \cdot e_2^3, \\ f_2 &= n \cdot f_1, \end{aligned} \quad (20)$$

где m и n – соответственно передаточные числа по e^3 - и f - переменным.

36. Модулированные двухсвязные элементы

В топологоэксергетическом методе применяют модулированные двухсвязные узлы – модулированные эксергетические трансформаторы MTF_3 , и модулированные эксергетические гираторы MGY_3 , модулированные MTD_3 – элементы. В этих элементах передаточные отношения представляют функции переменных системы x , времени и координат и поступают по активным связям.

Топологические символы этих элементов и определяющие отношения представлены в таблице 5.

Модулированный эксергетический трансформатор и модулированный эксергетический гиратор сохраняют эксергетическую мощность.

Таблица 5. Типы модулированных эксергетических двухсвязных элементов

Элемент	Топологоэксергетический символ	Определяющие отношения
Модулированный эксергетический трансформатор MTF_3 -элемент		$\begin{aligned} e_2^3 &= \Phi(x)e_1^3 \\ f_1 &= \Phi(x)f_2 \end{aligned}$
Модулированный эксергетический гиратор MGY_3 -элемент		$\begin{aligned} e_1^3 &= \Phi(x)f_2 \\ e_2^3 &= \Phi(x)f_1 \end{aligned}$
Модулированный эксергетический неидеальный проводник MTD_3 -элемент		$\begin{aligned} e_1^3 &= \Phi_1(x)e_2^3 \\ f_2 &= \Phi_2(x)f_1 \end{aligned}$

Выводы

1. Рассмотрены принципы формирования элементной базы топологоэксергетического метода, отражающие его основную концепцию.
2. Разработана элементная база топологоэксергетических структур связи, позволяющая описывать физико-технологические системы с сосредоточенными параметрами. В первой части работы рассмотрена группа элементов топологоэксергетического метода, отражающая представление одно- и двухсвязных структур ФТС.
3. Наименования элементов и их математическое представление определены в терминах, связанных с эксергией, мощностью и энергией.
4. Приведено топологоэксергетическое описание односвязных структур метода - диссипаторов, накопителей и источников эксергии.
5. Дано математическое и топологическое описание эксергетического мемристора, позволяющего отразить диссипацию, управляемую по эксергетическому импульсу или заряду.
6. Аналитически и топологически представлены разновидности двухсвязных элементов – трансформатора, гиратора и неидеального проводника субстанции и их модулированные варианты в топологоэксергетическом методе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия.- М.: Эксергия, 1968. 277 с.
2. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие/ Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.: Под ред. Долинского А.А., Бро-

- дянского В.М. АН УССР. Ин-т технической теплофизики.- Киев: Наукова думка, 1991. 360 с.
3. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.-М.: Наука, 1976. 500 с.
 4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации.-М.: Наука, 1979. 394 с.
 5. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического подхода анализа физико-технологических систем. *Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины — Днепрпет-ровск: НМетАУ, т.5, 2002. С. 67-71.*
 6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем// *Промышленная теплотехника. — 2003. - № 4 (приложение). С.116-118.*
 7. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС. // *Системні технології. -2003.- № 6(29). С.64-68.*
 8. Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах// *Інтегровані технології та енергозбереження.-2003. -№ 4. С. 20-27*
 9. Долгополов И.С. Тучин В.Т. Система переменных в топологоэксергетическом методе моделирования физико-технологических систем (ФТС) // *Математичне моделювання. — 2003. №2(10). С. 56-60.*

пост. 18.01.05

Напряжения изгиба в проволоках кабеля управления с учетом изгибной жесткости арматуры

Л.М. МАМАЕВ, Д.А.ШИТИКОВ

Днепродзержинский государственный технический университет

Получены теоретические зависимости по расчету кабелей повышенного удлинения с учетом изгибной жесткости арматуры.

Одержані теоретичні залежності з розрахунку кабелів з підвищенням подовженням з врахуванням згинальної жорсткості арматури.

The theoretical dependences for calculation of the heightened lengthening cables with regard for the flexural stiffness of cable fittings.

Для определения изгибных напряжений в элементах арматуры кабеля управления с учетом изгибной жесткости, необходимо определить величину деформации кручения $\tilde{\tau}$, которой мы пренебрегали в предыдущем расчете. С этой целью рассмотрим условие статического равновесия проволоки арматуры кабеля с учетом его взаимодействия с соседними элементами.

Если рассмотреть винтовой элемент кабеля в виде тонкого естественно изогнутого стержня, то все внутренние силы, действующие в поперечном сечении этого элемента, можно свести к главному вектору \bar{P} и главному моменту \bar{L} , приложенных в центре тяжести сечения. Кроме того на элемент кабеля (проволока или жила) по ее длине действует распределенная нагрузка, которую можно свести к векторам интенсивности силовой \bar{f} и моментной \bar{m} нагрузок, отнесенных к упругой линии элемента длины кабеля.

Дифференциальные уравнения равновесия элемента кабеля в векторной форме можно представить в виде:

$$\frac{d\bar{P}}{dS} = -\bar{f}; \quad \frac{d\bar{L}}{dS} = -[\bar{f} \times \bar{P}] - \bar{m}, \quad (1)$$

где \bar{P} , \bar{L} - векторы упругих сил и моментов.

Если спроектировать уравнения (1) на оси подвижного триэдра $\bar{b}, \bar{n}, \bar{\tau}$ (рис.), то получится 6 скалярных уравнений.

Проекция сил:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_n}{dS} + \omega_\tau P_b - \omega_b P_\tau &= -f_n; \\ \frac{dP_b}{dS} + \omega_n P_\tau - \omega_\tau P_n &= -f_b; \\ \frac{dP_\tau}{dS} + \omega_b P_n - \omega_n P_b &= -f_\tau. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Проекция моментов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dL_n}{dS} + \omega_\tau L_b - \omega_b L_\tau &= P_b - m_n; \\ \frac{dL_b}{dS} + \omega_n L_\tau - \omega_\tau L_n &= P_n - m_b; \\ \frac{dL_\tau}{dS} + \omega_b L_n - \omega_n L_b &= -m_\tau. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Две системы уравнений (2) и (3), устанавливающие взаимосвязь внутренних нагрузок в несущей арматуре кабеля, являются дифференциальными уравнениями Кирхгофа, записанные для тонких стержней. Для определения деформации кручения τ необходимо и достаточно использовать 3-е уравнение (3).

