УДК 621.1.016.7: 621.372.2

Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПИСАНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ФТС)

(Часть 1)

Тополоэксергетический метод моделирования ФТС [1-11] позволяет на основе системного анализа описывать во взаимосвязи различные процессы, представляя с позиций топологоэксергии энергетическую сторону вопроса, формируя при этом его смысловой и математические принципы. Разработка этого научного направления неразрывно связана с развитием теоретических основ энергосбережения и энергетического анализа ФТС.

Используемый ранее эксергетический подход [12] для энергетического анализа систем имеет ряд существенных недостатков:

1. Не рассматриваются во взаимосвязи различные физико-химические особенности процессов в контексте энергосбережения;

2. Отсутствует динамический подход к эксергетическому анализу ФТС;

3. Не отражены причинно-топологические особенности энергетического анализа ФТС;

4. Нет возможности представить характеристические свойства анализируемой ФТС (чувствительность, надежность, помехозащищенность, сложность, эмерджентность и интерэктность);

5. Отсутствует обобщенный подход с единых энергетических позиций к анализу энергозатрат в ФТС для решения задач энергосбережения.

Известно широкое применение теоремы Телледжена в теории электрических цепей [13]. В данной работе предпринята попытка применить эту теорему в разрабатываемом нами топологоэксергетическом методе энергетического анализа ФТС.

Рассмотрим произвольную ФТС с сосредоточенными параметрами и выберем ассоциированные опорные направления для обобщенных эксергетических усилий связей e_k и обобщенных потоков связей f_k (следовательно, $e_k(t) \cdot f_k(t)$ есть эксергетическая мощность, передаваемая ФТС связи k в момент времени t). Далее, пренебрежем природой связей, т.е. представим ФТС как тополоэксергетический граф связи.

Теорема Телледжена утверждает, что

$$\sum_{k=1}^{b} \mathring{a}_k f_k = 0 . \qquad (1)$$

Единственное требование, предъявляемое к обобщенным эксергетическим усилиям связей e_k, это то, что они должны удовлетворять всем ограничениям, исходящим из 2-го закона Кирхгофа для обобщенного эксергетического усилия. Аналогично этому, обобщенные потоки связи f_k должны удовлетворять всем ограничениям, исходящим из закона Кирхгофа для обобщенного потока. Природа элементов, или фактически какие элементы будут иметь e_k и f_k, абсолютно не имеет значения для справедливости теоремы Телледжена. Сила теоремы заключается в том, что e_k и f_k произвольны, исключая ограничения законов Кирхгофа.

Эта теорема является чрезвычайно общей. Она может быть применена к любой ФТС с сосредоточенными параметрами, содержащей любые элементы, линейные и нелинейные, пассивные или активные, изменяющиеся во времени или постоянные во времени. Эта общность достигается благодаря тому, что теорема Телледжена вытекает из двух законов Кирхгофа.

Теперь важно показать, что теорема Телледжена имеет ценность для топологоэксергетических структур связей. Будем предполагать, что правило знаков выбрано в соответствии с согласованными относительными направлениями, т.е. связи направляются к элементам.

Теорема 1. Для топологоэксергетического связного графа Г, состоящего из односвязных элементов и узлов справедливо, что

$$\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} \mathring{a}_i f_i = 0\,. \tag{2}$$

Доказательство. Так как все односвязные элементы соединяются либо с 1-узлом, либо с 0-узлом, можно подсчитать все элементы в топологическом связном графе путем подсчета элементов, связанных с каждым узлом, а затем подсчитывая все узлы ФТС. Используя уравнения

$$\text{для 0-узла } e_1 = e_2 = \ldots e_n \equiv e, \tag{3}$$
$$\text{для 1-узла } f_1 = f_2 = \ldots f_n \equiv f, \tag{4}$$

можно записать

$$\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} \mathring{a}_i f_i = \sum_{j=1}^{K_0} \mathring{a}_j \sum_{i=1}^{\alpha_j} f_{ji} + \sum_{j=1}^{K_1} f_j \sum_{i=1}^{\beta_j} e_{ji}, \tag{5}$$

где K_0 и K_1 обозначают общее число 0-узлов и 1-узлов в Г, соответственно; α_j и β_j обозначают число элементов, связанных с j-ым 0-узлом и j-ым 1-узлом в Г, соответственно.

Вводя ограничения Кирхгофа, представим уравнения:

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_i f_i = 0, \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_i e_i = 0, \tag{7}$$

где σ_i равняется +1, если i-связь направлена из узла и –1, если она направлена к узлу.

Применяя предположение о том, что все связи направлены к элементам (согласованные относительные направления), мы имеем:

$$\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} \mathring{a}_i f_i = -\sum_{j=1}^{K_0} \mathring{a}_j \sum_{b=1}^{K_0^j - \alpha_j} \sigma_{jb} f_{jb} - \sum_{j=1}^{K_1} f_j \sum_{b=1}^{K_1^j - \beta_j} \sigma_{jb} e_{jb}, \tag{8}$$

где σ_{jb} равняется +1 (-1), если связь *b* направлена из (в) узел *j*, и где $\hat{E}_0^j$ è K_1^j – общие числа связей, инцидентных *j* нулевому узлу и *j* единичному узлу Г.

Только те связи, которые подсчитываются в суммарном уравнении (8), являются связями, соединяющими два узла вместе. Каждая из этих связей считается дважды – первый раз на узле, из которого она выходит и еще раз на узле, в который входит. Две величины в суммах, которые соответствуют какой-либо связи, составляющей два 0-узла и два 1-узла, погашаются (сокращаются), так как их усилия и потоки будут равными, но σ будет равна +1 для первой величины и –1 для другой. Оставшиеся величины в суммах соответствуют связям, соединяющим 0-узел с 1-узлом. Определяя «оператор смежности»

$$\delta_{st} = \begin{cases} +1, & \text{åñëè óçåë s è t ñâÿçàí û âì åñòå} \\ 0, & \text{â ï ðî òèâí î ì ñëó÷àå} \end{cases} \qquad (9)$$

можем представить уравнение (8) в форме:

$$\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} å_i f_i = -\sum_{s=1}^{\hat{E}_0} \sum_{t=1}^{K_1} å_s f_{st} \sigma_{st} \delta_{st} - \sum_{t=1}^{\hat{E}_0} \sum_{s=1}^{K_1} f_t e_{ts} \sigma_{ts} \delta_{ts}, \qquad (10)$$

где индекс *st* обозначает, что связь направлена от узла *s* к узлу *t*. Заметим, что по определению σ_{ts}=-σ_{st} и δ_{ts}= δ_{st}, и, следовательно,

$$\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} å_i f_i = -\sum_{s=1}^{\hat{E}_0} \sum_{t=1}^{K_1} \sigma_{st} \delta_{st} (e_s f_{st} - e_{ts} f_t). \qquad (11)$$

Однако, так как при определении узлов в уравнениях (3) и (4) подразумевается, что

$$\left. \begin{array}{l} e_s = e_{ts} \quad \text{äëÿ âñåõ t òàêèõ, ÷òî} \quad \delta_{\mathrm{st}} = 1 \\ \text{è } f_t = f_{st} \quad \text{äëÿ âñåõ s òàêèõ, ÷òî} \quad \delta_{\mathrm{st}} = 1 \end{array} \right\}, \qquad (12)$$

тогда $\sum_{\text{ýëåì åí ò û}} å_i f_i = 0$, что и требовалось доказать.

Эта теорема является чисто топологическим результатом, зависящим от законов Кирхгофа для обобщенных потоков (ЗКП) и обобщенных эксергетических усилий (ЗКУ) и не зависящим от природы элементов топологоэксергетических структур связи.

Для иллюстрации применения этой теоремы рассмотрим топологоэксергетическую структуру связи ФТС, приведенную на рис.1, и, используя формулы (5) и (8), покажем их реализуемость:

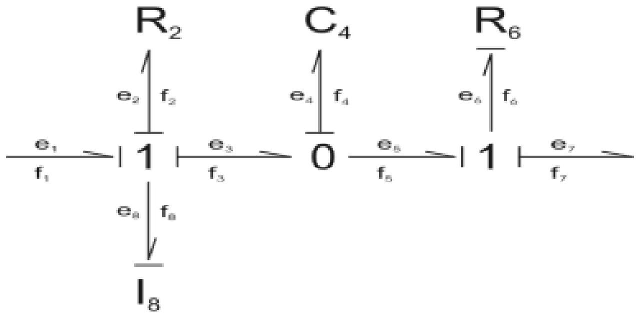

Рисунок 1 – Топологоэксергетическая структура связи ФТС (трубопровод)

1. $$\sum_{\text{ýëåì åí òû}} \mathrm{e_i} f_i = \sum_{j=1}^{K_0} e_j \sum_{i=1}^{\alpha_j} f_{ji} + \sum_{j=1}^{K_1} f_j \sum_{i=1}^{\beta_j} e_{ji};$$

$$\sum_{\text{ýëåì åí òû}} \mathrm{e_i} f_i = e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6;$$

$$\sum_{j=1}^{K_0} e_j \sum_{i=1}^{\alpha_j} f_{ji} = e_4 f_4;$$

K_0=1 – количество 0-узлов;
α_j=1 – количество элементов, связанных с j-ым 0-узлом.

$$\sum_{j=1}^{K_1} f_j \sum_{i=1}^{\beta_j} e_{ji} = f_2 e_2 + f_8 e_8 + f_6 e_6;$$

K_1=2 – количество 1-узлов;
β_j – количество элементов, связанных с j-ым 1-узлом;
β_1=2;
β_2=1.

$$e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6 = e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6 .$$

2. $$\sum_{\text{ýëåì åí òû}} \mathrm{e_i} f_i = -\sum_{j=1}^{K_0} e_j \sum_{\hat{a}=1}^{K_0^j - \alpha_j} \sigma_{j\hat{a}} f_{j\hat{a}} - \sum_{j=1}^{K_1} f_j \sum_{\hat{a}=1}^{K_1^j - \beta_j} \sigma_{j\hat{a}} e_{j\hat{a}};$$

$$\sum_{\text{ýëåì åí òû}} \mathrm{e_i} f_i = e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6;$$

$$-\sum_{j=1}^{K_0} e_j \sum_{\hat{a}=1}^{K_0^j - \alpha_j} \sigma_{j\hat{a}} f_{j\hat{a}} = e_4 f_3 - \mathring{a}_4 f_5;$$

$$e_4 f_4 = \mathring{a}_4 f_3 - e_4 f_5;$$

$$K_0 = 1; \quad \mathrm{K}_0^{\mathrm{j}} = 3; \quad \alpha_{\mathrm{j}} = 1.$$

$$-\sum_{j=1}^{K_1} f_i \sum_{\hat{a}=1}^{K_1^j - \beta_j} \sigma_{j\hat{a}} e_{j\hat{a}} = f_1\mathring{a}_1 - f_3 e_3 + f_5\mathring{a}_5 - f_7 e_7 = e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_6 f_6;$$

$$f_1\mathring{a}_1 - f_3 e_3 = f_2\mathring{a}_2 + f_8 e_8;$$

$$f_5\mathring{a}_5 - f_7 e_7 = f_6\mathring{a}_6;$$

$$K_1 = 2; \quad \mathrm{K}_1^1 = 4; \quad \mathrm{K}_1^2 = 3; \quad \beta_1 = 2; \quad \beta_2 = 1.$$

$$e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6 = e_2 f_2 + e_8 f_8 + e_4 f_4 + e_6 f_6 .$$

Используем в качестве примера ту же топологоэксергетическую структуру связи ФТС, и, применяя формулы (10,11), после соответствующих преобразований получим аналогичные результаты, доказывающие их применимость и реализуемость.

Следствие 1. Для топологоэксергетического связного графа Г, состоящего из многосвязанных элементов и узлов справедливо, что

$$\sum_{\text{ýëåì åí òû}} \mathrm{e}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}} f_i = 0, \tag{13}$$

где $\mathrm{e}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}$ – транспонированные векторы обобщенных эксергетических усилий связей (переменные ЗКУ: напряжение, химический потенциал, давление, удельная эксергия и т.д.); f_i – векторы обобщенных потоков связей (переменные ЗКП: ток, поток химической реакции, объемный расход, массовый расход и т.д.) i-той многосвязанной системы одновременно существующие в ФТС.

При этом выражение (13) отражает то, что в любой момент сумма подаваемых и потребляемых эксергетических мощностей равна нулю.

Приведенные рассуждения справедливы независимо от природы элементов и входных величин анализируемой системы. Если ФТС имеет входные переменные, то мы можем записать следующее выражение

$$\sum_{\hat{a}\tilde{o}^3} e_{\hat{a}\tilde{o}^3} f_{\hat{a}\tilde{o}^3} = \sum_{\hat{a}\acute{\imath} j} e_{\hat{a}\acute{\imath} j} f_{\hat{a}\acute{\imath} j}, \tag{14}$$

где для обозначения внутренних связей и элементов ФТС используется подстрочное обозначение – *вн*, а для обозначения входов – *вх*.

Теорема квазиэксергетической мощности

Для ФТС рассматриваемых в двух состояниях может быть выполнено обобщение (14). Под разными состояниями анализируемой системы имеются в виду обобщенные эксергетические усилия и обобщенные потоки, соответствующие различным входным величинам, различным по составу элементам или различным величинам элементов, или же различным начальным условиям, но при одной и той же топологии.

Под двумя состояниями ФТС подразумеваются действующие состояния двух различных систем, которые имеют одинаковую топологию в виде, например, линейных графов, диаграмм связи или топологоэксергетических структур связи. Законы Кирхгофа применимы к каждому состоянию и показывают, что

$$(\text{ÇÊÏ})\;\; f'_{\text{âí}\,\alpha} = \Sigma_{\text{âí}\,\beta} \cdot \hat{A}_{\text{âí}\,\beta\alpha} \cdot f'_{\text{âí}\,\beta}, \tag{15}$$

$$(\text{ÇÊÓ})\;\; \Sigma_{\text{âí}\,\alpha} \cdot \hat{A}_{\text{âí}\,\beta\alpha} \cdot \mathring{a}''_{\text{âí}\,\alpha} = 0, \tag{16}$$

где один штрих и два штриха относятся к двум состояниям ФТС; $f'_{\textit{вн}\beta}$ – независимые обобщенные потоки в количестве c-t+r (c – количество связей, t – узлов и r – отдельных частей); $B_{\textit{вн}\beta\alpha}$ – элементы прямоугольной матрицы порядка [(c-t+r)·c], известной как контурная матрица.

Тогда обобщение (14) может быть выполнено для ФТС в двух состояниях, исходя из (15) и (16), в следующем виде

$$\Sigma_{\text{âõ³}} f'_{\text{âõ³}} \cdot \mathring{a}''_{\text{âõ³}} = \Sigma_{\text{âí}\,\alpha} f'_{\text{âí}\,\alpha} \cdot \mathring{a}''_{\text{âí}\,\alpha}. \tag{17}$$

Отметим, что $f'_{\text{âõ³}}$ è $f'_{\text{âí}\,\alpha}$ подчиняются ЗКП, но не обязательно соответствуют любой системе действующих потоков в сети, потому что соответствующие эксергетические усилия могут не подчиняться ЗКУ, по этой причине они могут пониматься как «виртуальные обобщенные потоки» и аналогично $\mathring{a}''_{\text{âõ³}}$ è $\mathring{a}''_{\text{âí}\,\alpha}$ – как «виртуальные обобщенные эксергетические усилия».

Аналогично обобщенные эксергетические усилия $\mathring{a}''_{\text{âõi}}$ è $\mathring{a}''_{\text{âõ}\alpha}$ подчиняются ЗКУ, но в общем случае не соответствуют какой-либо системе обобщенных потоков, которые подчиняются ЗКП. Теорема Телледжена, применяемая нами для анализа ФТС, может рассматривать обобщенные потоки и эксергетические усилия, которые не обязательно существуют в системе, по крайней мере, в одно и то же время. Такие произведения, как $f'_{\text{âõi}} \cdot \mathring{a}''_{\text{âõi}}$, не являются эксергетической мощностью и называются квазиэксергетической мощностью.

Теорема квазиэксергетической мощности (17) является трансформированной формой, первоначально данной Телледженом в [13], и примечательна тем, что в соответствии с этой теоремой оба состояния ФТС не должны быть обязательно связаны друг с другом.

Операторы Кирхгофа

Теорема Телледжена может быть обобщена применительно к энергетическому анализу ФТС при помощи операторов. Их введение позволяет объединить несколько теорем одновременно. В зависимости от выбора оператора общая форма приводит к более специализированным уравнениям.

Мы рассмотрим образование множества обобщенных потоков в связях посредством оператора Λ, действующего на действительные или виртуальные потоки связей системы. Если результат является рядом потоков, подчиняющихся ЗКП, то назовём Λ обобщенным потоковым оператором Кирхгофа. Например, если множество потоков в связях $\{f_{\textit{вн}\alpha}(t)\}$ подчиняются ЗКП, то и их произведение по времени подчиняется этому закону. Таким образом, одним примером обобщенного потокового оператора Кирхгофа является производная по времени, другим примером – преобразования Фурье; если

$\{f_{вн\alpha}(t)\}$ подчиняется первому закону Кирхгофа, то ему подчиняется и множество преобразований Фурье $\{I_{вн\alpha}(\omega)\}$.

Аналогично будем называть оператор Λ оператором обобщенного эксергетического усилия Кирхгофа, если он дает множество эксергетических усилий связей, подчиняющихся ЗКУ, когда действует на систему обобщенных эксергетических усилий, подчиняющиеся этому закону.

Мы будем применять термин оператор Кирхгофа, имея в виду оператор обобщенного эксергетического усилия Кирхгофа или обобщенный потоковый оператор Кирхгофа в зависимости от того, какой становится подходящим в контексте. Многие операторы Кирхгофа являются и потоковыми операторами и операторами эксергетических усилий, но это не всегда так. В примерах, упомянутых выше, оператор Кирхгофа (рассмотрим оператор обобщенных эксергетических усилий Кирхгофа) применяется отдельно к каждому (действующему или виртуальному) усилию связей. Но вообще операторы применяются ко всей системе обобщенных эксергетических усилий связей.

Общая форма эксергетической теоремы Телледжена

Пусть Λ' и Λ'' будут два (возможно разные) операторы Кирхгофа. Если Λ' линейный оператор, тогда эффект действия его на уравнение (15) будет

$$\Lambda' f_{\text{âí}\,\alpha} = \Sigma_{\text{âí}\,\beta} \hat{A}_{\text{âí}\,\beta\alpha} (\Lambda' f_{\text{âí}\,\beta})\,. \tag{18}$$

Если Λ' не является линейным оператором, значит он – обобщенный потоковый оператор Кирхгофа и показывает, что множество потоков $\{\Lambda' f_{вн\alpha}\}$ подчиняются ЗКП и, следовательно, подчиняется уравнению, подобному (18), но с $\Lambda' f_{вн\beta}$, замененными на соответствующие величины.

Аналогично, если Λ'' является оператором обобщенных эксергетических усилий Кирхгофа, то $\Lambda'' e_{вн\alpha}$ подчиняется уравнению, подобному (16):

$$\Sigma_{\text{âí}\,\alpha} \hat{A}_{\text{âí}\,\beta\alpha} (\Lambda'' e_{\text{âí}\,\alpha}) = 0\,. \tag{19}$$

Если Λ'' является линейным оператором, то (19) может быть найдено из (16). Точно таким же путем, который ведет от (15) и (16) к (17), получим:

$$\Sigma_{\text{âxi}} \Lambda' f_{\text{âxi}} \Lambda'' e_{\text{âxi}} = \Sigma_{\text{âí}\,\alpha} \Lambda' f_{\text{âí}\,\alpha} \Lambda'' e_{\text{âí}\,\alpha}\,. \tag{20}$$

Это наиболее общая формулировка эксергетической теоремы Телледжена, на которую будем ссылаться. Она имеет силу для любых операторов Кирхгофа Λ' и Λ'', для любых конститутивных законов элементов, для любых типов входных величин и для любых начальных условий. Если Λ' и Λ'' принимаются как операторы тождественности, (20) приводится к (14). С другой стороны, если Λ' и Λ'' избирают различные состояния ФТС, (20) сводится к теореме квазиэксергетической мощности (17). Чтобы отличить (20) от двух других форм эксергетической теоремы Телледжена, уравнение (20) назовем «сильной формой».

«Слабые формы» эксергетической теоремы Телледжена

Изменим роли Λ' и Λ'' в уравнении (20) теоремы Телледжена, предполагая, что операторы Λ' и Λ'' одновременно являются обобщенными потоковыми операторами и обобщенными операторами усилий Кирхгофа, тогда получим:

$$\Sigma_{\hat{a}xi}\Lambda'' f_{\hat{a}xi}\Lambda' e_{\hat{a}xi} = \Sigma_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda'' f_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda' e_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\,. \qquad (21)$$

Вычтем (21) из (20):

$$\Sigma_{\hat{a}xi}(\Lambda' f_{\hat{a}xi}\Lambda'' e_{\hat{a}xi} - \Lambda'' f_{\hat{a}xi}\Lambda' e_{\hat{a}xi}) = \Sigma_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}(\Lambda' f_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda'' e_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha} - \Lambda'' f_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda' e_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}). \qquad (22)$$

Это уравнение будем называть “разностной формой” эксергетической теоремы Телледжена. Оно может быть получено из “сильной формы”, но обратное невозможно.

Сумма (20) и (21) приводит нас к другому виду эксергетической теоремы Телледжена:

$$\Sigma_{\hat{a}xi}(\Lambda' f_{\hat{a}xi}\Lambda'' e_{\hat{a}xi} + \Lambda'' f_{\hat{a}xi}\Lambda' e_{\hat{a}xi}) = \Sigma_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}(\Lambda' f_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda'' e_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha} + \Lambda'' f_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}\Lambda' e_{\hat{a}\acute{\imath}\,\alpha}). \qquad (23)$$

Это уравнение называется «суммовой формой» эксергетической теоремы Телледжена. Две «слабые формы» теоремы полезны по двум причинам. Во-первых, они могут быть использованы во многих случаях применения эксергетической теоремы Телледжена, и было бы неудобным обращаться дважды к «сильной форме». Во-вторых, «слабые формы» эксергетической теоремы удобно использовать для волновых переменных.

Выводы

1. Выявлены основные недостатки эксергетического подхода при описании ФТС.

2. Сформулирована теорема Телледжена для топологоэксергетических структур связи и выполнено ее доказательство.

3. Получены зависимости, позволяющие анализировать различные топологоэксергетические структуры связи. На примере показано применение этих зависимостей.

4. Для топологоэксергетических структур связи, состоящих из многосвязанных элементов и узлов, сформулировано следствие теоремы Телледжена.

5. Получена математическая формулировка теоремы квазиэксергетической мощности применительно к топологоэксергетическим структурам связи.

6. Показано применение операторов Кирхгофа для обобщенного и компактного представления ФТС в топологоэксергетическом анализе.

7. Представлена формулировка общей и «слабой» форм эксергетической теоремы Телледжена применительно к топологоэксергетическому методу описания ФТС.

Литература

1. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л. и др. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя// Материалы второй Всесоюзной научной конференции «Современные машины и аппараты химических производств», Т.1, Чимкент, 1980, с.149-152.

2. Дорохов И.Н., Горбацевич Л.Л., Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем. Деп. в ВИНИТИ. №1274-78(78). «Депон. рук.» 1978, -24 с. б/о №540.

3. Тучин В.Т.,Дорохов И.Н. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико-химических систем на основе диаграмм связи. Деп. в ВИНИТИ. №3296-78(79). «Депон.рук.» 1979, №2 - 25 с. , б/о №219.

4. Тучин В.Т. Системный подход к моделированию газодинамики верхней зоны доменной печи с помощью топологического метода описания физико-химических систем // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Проблемы автоматизированного управления доменным производством», октябрь, 1983, Киев, с.15.

5. Тучин В.Т., Кафаров В.В.,Дорохов И.Н. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи // Докл. АН СССР, 1979,т.244, №23,с.664-668.

6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // Промышленная теплотехника. 2003, т.25, №24,с.116-118.

7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодисспативная функция как основа топологоэксергетического анализа физико-технологических систем. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: НМетАУ, т.5, 2002,с. 67-71.

8. 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.4, с.20-26.

9. 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

10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”, Дніпродзержинськ, 2002, с.235-236.

11. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // III Всеукраинская научная конференция «Математические проблемы технической механики» (материалы конференции). Днепродзержинск, 2003, с.49.

12. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 288 с.

13. B.D.H.Tellegen. A General Network Theorem, with Applications. Philips Res.Rep.7, p.254-269.

УДК 621.1.016.7 : 621.372.2

Тучин В.Т., Долгополов І.С., Братута Е.Г., Тучина У.М.

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТОПОЛОГОЕКСЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОПИСУ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ (ФТС)

Розглядаються енергетичні аспекти створюваного авторами топологоексергетичного методу аналізу енергозбереження фізико-технологічних систем. Приведено доказ можливості застосування теореми Телледжена для топологоексергетичних структур зв'язку. Розглянуто наслідки з цієї теореми, що мають практичне значення при аналізі ефективності енергетичної структури ФТС.