

УДК 621.311.001.57 (575.2) (04)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ  
СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА В ИССЛЕДОВАНИЯХ  
РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Н.К. Аниев* – аспирант,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

---

Technological methods and the results of application of the model for solving some problems of the EPS development under modern conditions, such as an assessment of the EPS system efficiency in Kyrgyzstan and the investigation of the country's energy security are considered in the article.

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) являются сложнотехническими территориально протяженными системами, имеющими неоднородную сетевую структуру. Неоднородность структуры – фундаментальное свойство сложных ЭЭС. В существенной мере она определяет характер поведения системы и требования к ее развитию. Необходимо выявлять структурную неоднородность сложных ЭЭС, количественно оценивать ее характеристики, учитывать эти характеристики при моделировании, анализе, планировании развития таких систем [1, 2].

В технологическом плане ЭЭС рассматривается как технически единая система, включающая параллельно работающие электростанции, связанные между собой и с потребителями электрической сетью. Моделирование ЭЭС может быть различным в зависимости от характера задачи и уровня рассмотрения. Например, выбор структуры и размещения генерирующих мощностей ЭЭС Кыргызстана при формировании стратегии развития электроэнергетики страны может производиться при агрегированном представлении крупных подсистем и пропускных способностей связей между ними. При решении аналогичной задачи на уровне подсистем структура последних детализируется в рамках того же типа описа-

ния в виде агрегированных подсистем и пропускных способностей связей между ними. Обоснование развития электрической сети требует детального ее представления при найденных на предыдущих этапах генерирующих мощностях и их размещении. При этом на уровне ЭЭС Кыргызстана может рассматриваться системообразующая электрическая сеть 220–500 кВ высших напряжений, а на уровне подсистем электрическая сеть детализируется путем дополнительного учета элементов (ЛЭП, подстанций) более низких классов 6–110 кВ напряжений. Вся эта совокупность задач обоснования решений по развитию ЭЭС представляет иерархическую последовательность, от стадии к стадии которой уточняются (а также обосновываются новые) решения по развитию системы за счет более детального рассмотрения в технологическом и территориальном аспектах.

**Постановка задачи.** Модели ЭЭС на указанных двух уровнях описания задачи примем следующими. На нижнем уровне для оценки допустимости режимов и анализа устойчивости системы будем рассматривать детальное описание установившихся режимов и переходных процессов в ЭЭС в обычном принятом виде, т.е. с представлением реальных или агрегированных ЛЭП, трансформаторов, электро-

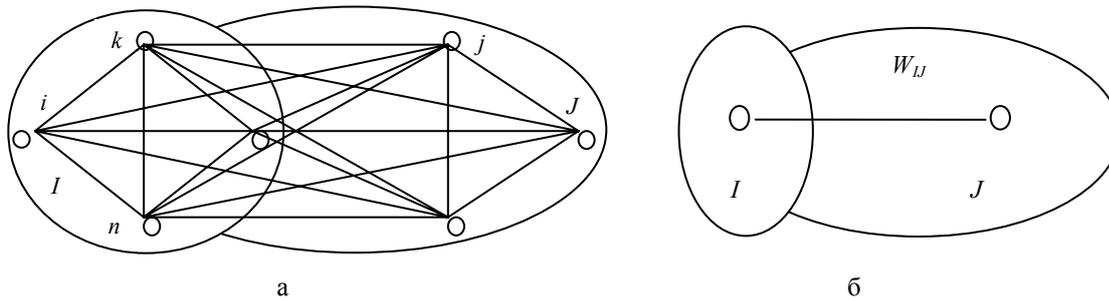


Рис. 1. Схема ЭЭС из двух подсистем (а) и ее структурное представление (б).  
Следовательно, имеем две сильно связанные подсистемы  $I$  и  $J$   
и структурно слабое сечение между ними.

станций и узлов нагрузки с их параметрами, используемыми для такого описания на базе системы уравнений узловых напряжений. Для решения подзадачи верхнего уровня сформируем агрегированное описание ЭЭС в виде совокупности крупных узлов, представляющих подсистемы, связи внутри которых не ограничивают обмены мощности и поэтому не учитываются, а агрегированные узлы (подсистемы) связаны между собой некоторыми агрегированными связями с ограниченными пропускными способностями [3].

Таким образом, на верхнем уровне используется агрегированная модель ЭЭС, а на нижнем – более детальные модели.

Рассмотрим условную схему ЭЭС (рис. 1), где генераторы  $i, k \in \overline{1, n}$  принадлежат подсистеме  $I$ , т.е.  $i, k \in I$ , а генераторы  $j, l \in \overline{1, m}$  – подсистеме  $J$  т.е.  $j, l \in J$ . Сильные связи внутри подсистем и слабые связи между подсистемами имеют место, если

$$w_{ik} \gg w_{ij}; w_{jl} \gg w_{jk}, \quad (1)$$

или

$$w_{ij} \leq \mathcal{E}_c w_{ik}; w_{jk} \leq \mathcal{E}_c w_{jl}, \quad (2)$$

Здесь и далее  $\mathcal{E}_c$  – малая величина.

В предлагаемой методике за численную меру связности будем принимать максимальную величину взаимной мощности между двумя генераторами, которая пропорциональна взаимной проводимости и одновременно учитывает класс напряжения [3, 4].

$$w_{ij} = E'_i E'_j y_{ij}; i, j \in \overline{1, n}, \quad (3)$$

где  $E'_i E'_j$  – переходные ЭДС генераторов в модели,  $y_{ij}$  – взаимная проводимость между

узлами приложения ЭДС  $E'_i$  и  $E'_j$ ,  $n$  – количество элементов (генераторов) в системе.

Следует отметить, что хотя величина ЭДС зависит от режима, они изменяются в сравнительно небольших пределах. Поэтому в тех случаях, когда целью исследования является не принятие окончательного решения, а оценка или ранжировка состояний системы, целесообразно принимать величину ЭДС равной средненоминальной, что позволит исключить трудоемкую процедуру предварительного расчета режима для большого количества состояний и ускорить процесс анализа. Примем приближенный способ агрегирования узлов, который исходит из допущения, что если  $y_{ij} \gg y_{ik}$ , что означает сильную связь между узлами  $i$  и  $j$  – слабые связи этих узлов с остальными, то можно полагать, что  $y_{ij} = \infty$ . Это позволяет объединить узлы  $i$  и  $j$  в один агрегированный. Формальная реализация алгоритма состоит в суммировании строк и столбцов матрицы  $Y$ , соответствующих узлам агрегируемой подсистемы, и усреднении напряжений  $U_i$  этих узлов для получения напряжения агрегированного узла. Дезагрегирование при этом также является приближенным и состоит в присвоении узлам исходной подсистемы значения напряжения агрегированного узла, представляющего эту подсистему.

В задачах на верхнем уровне иерархии моделей используется представление ЭЭС в виде потоковой модели. Это позволяет абстрагироваться от множественности возможных электрических режимов ЭЭС, получаемых на основе уравнений узловых напряжений, и рассматривать задачи обоснования развития ЭЭС, используя линейные модели системы вида [3]:

$$AZ = B, \quad (4)$$

$$Z \leq D, \quad (5)$$

где  $Z, D$  – векторы потоков и пропускных способностей ветвей,  $B$  – вектор потоков (истоков и стоков) вершин графа,  $A$  – матрица инцидентий.

Задача состоит в определении составляющих вектора  $D$ . Необходимые оценки на основе модели, использующей уравнения узловых напряжений, дает формула (3) [4]:

$$d_{ij} = w_{ij} = E'_i E'_j y_{ij}; \quad i, j = \overline{1, n}, \quad d_{ij} \in D. \quad (6)$$

Учитывая, что в потоковой модели верхнего уровня вершины обычно представляют собой соответствующие подсистемы модели нижнего уровня, пропускная способность связи между такими подсистемами  $I$  и  $J$  есть

$$d_{IJ} = w_{IJ} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_{ij}. \quad (7)$$

**Расчетные условия.** Одной из основных целей формирования иерархической структурной модели сложной ЭЭС в результате структурного анализа является выработка рекомендаций по эквивалентированию схем замещения системы. На основе этих общих рекомендаций, а также зависимости от конкретных задач последующих детальных исследований с учетом группировки узлов и связей по их роли в работе ЭЭС формируется структура конкретных эквивалентных схем замещения. Для

получения параметров этих эквивалентных схем должны быть использованы соответствующие методы и алгоритмы преобразования схем замещения ЭЭС.

Проиллюстрируем на примере одного из вариантов схемы развития ЭЭС Кыргызстана особенность построения агрегированной модели с помощью двух алгоритмов.

Исходная упрощенная схема замещения ЭЭС Кыргызстана ВЛ 220 кВ и выше включает 144 узла, 154 связи и 13 эквивалентных генераторов (рис. 2). Эта схема сложна для анализа, и ориентироваться в ее свойствах, исходя из характеристик отдельных физических связей (ВЛ различных классов напряжений), невозможно.

Представление о роли отдельных составляющих ЭЭС в ее работе трудно получить, если использовать схему большей размерности. Поэтому исходная схема замещения должна быть сэквивалентирована в соответствии с [3, 4] до 6 генераторных узлов (рис. 3).

Эквивалентная матрица собственных и взаимных проводимостей (СВП) может быть получена из исходной матрицы СВП путем математических действий над матрицами. Для этого исходная матрица  $\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$  разбивается на четыре квадратные подматрицы:

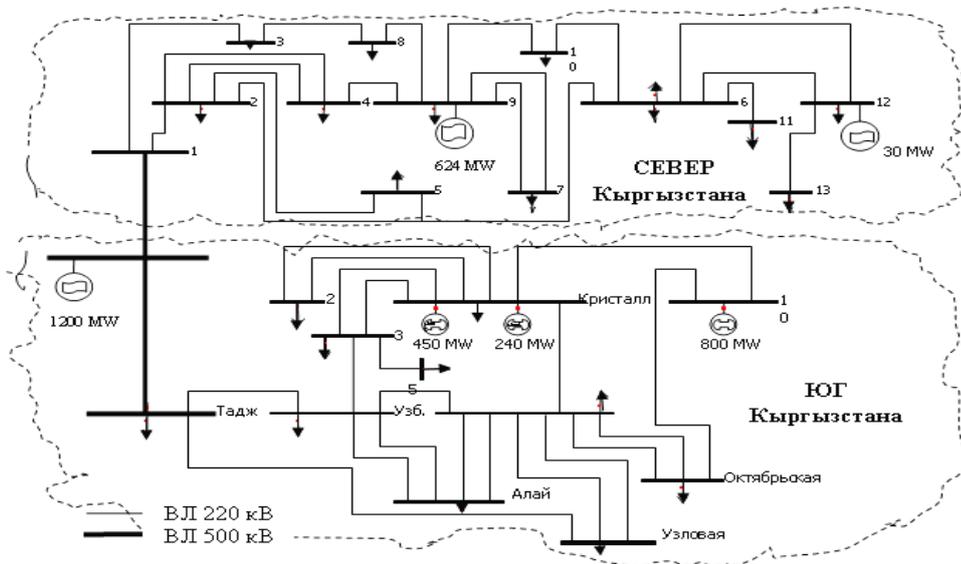


Рис. 2. Упрощенная схема замещения ВЛ 220 кВ и выше ЭЭС Кыргызстана.

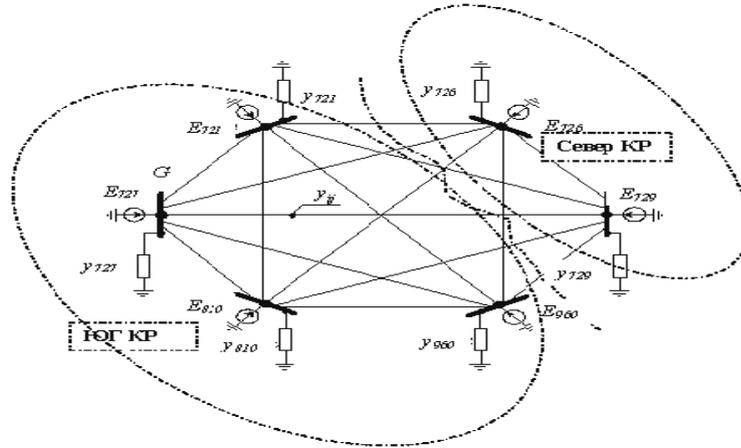


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения ЭЭС: взаимные проводимости генераторных узлов обозначены сплошными линиями ( $y_{ij}$ ).

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ba} \\ \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{bb} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Эквивалентная матрица собственных и взаимных проводимостей (СВП) может быть получена из исходной матрицы СВП путем математических действий над матрицами. Для этого исходная матрица  $\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$  разбивается на четыре квадратные подматрицы:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ba} \\ \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{bb} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где индексом "b" обозначены те узлы, которые необходимо исключить (нагрузочные узлы), остающиеся (генераторные) узлы имеют индекс "a". С учетом этого систему уравнений узловых напряжений можно записать в виде:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Y}_{ab} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_r \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} \dot{Y}_{ba} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Y}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (10)$$

Эквивалентная матрица СВП генераторных узлов получается путем следующей математической операции:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{Y}_{ab} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{Y}_{bb} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{Y}_{ba} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Таким образом, определив матрицу  $\begin{bmatrix} \dot{Y}_s \end{bmatrix}$  и

зная значения ЭДС в узлах генераторов, мы можем легко найти искомую матрицу  $W_{ij}$ , на диагонали которой расположены собственные структурные мощности генераторов, а остальные элементы представляют взаимные структурные мощности между соответствующей парой генераторов:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} E \end{bmatrix}_{\text{diag}} \cdot \begin{bmatrix} Y_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \end{bmatrix}_{\text{diag}}, \quad (12)$$

где  $\begin{bmatrix} E \end{bmatrix}_{\text{diag}}$  – диагональная матрица модулей

ЭДС в генераторных узлах,  $\begin{bmatrix} Y_s \end{bmatrix}$  – матрица,

у которой диагональные элементы представляют активные составляющие собственных проводимостей генераторных узлов в эквивалентной матрице СВП  $-g_{ii} = \text{Re}(\dot{y}_{ii})$ , остальные элементы – модули взаимных проводимостей между генераторными узлами в той же матрице  $y_{ij} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{ij} \end{bmatrix}$ .

Матрица  $W$  – квадратная, симметричная матрица ( $W_{ij} = W_{ji}$ ) и для схемы (рис. 3) получается следующей (запишем лишь верхнюю часть матрицы в виде табл. 1).

Таблица 1  
Матрица  $[w_{ij}]$  для электрической сети Кыргызстана

	<b>721</b>	<b>727</b>	<b>810</b>	<b>960</b>	<b>726</b>	<b>729</b>
<b>721</b>	xxx	126,0	90,8	119,7	53,8	80,1
<b>727</b>		xxx	76,7	160,0	49,7	53,9
<b>810</b>			xxx	124,8	67,4	49,5
<b>960</b>				xxx	64,9	43,5
<b>726</b>					xxx	153,5
<b>729</b>						xxx

При построении иерархической классификации можно воспользоваться двумя основными способами: восходящей и нисходящей классификации [5]. Первый способ заключается в построении вложенных разбиений, начиная с разбиения, содержащего одноэлементные классы, и кончая разбиением, состоящим из единственного класса – множества  $I$ . Во втором методе – все наоборот. Для этого производятся повторные разбиения каждого из классов, полученных на первом шаге.

**Результаты расчетов.** Используем рекуррентный алгоритм нисходящей классификации, основанный на значениях силы связей между кластерами. В результате применения алгоритма в энергосистеме выявляются две концентрированные подсистемы со слабым сечением между ними (рис. 4).

Рассмотрим матричный алгоритм, реализованный в профессиональной версии пакета MATLAB®6.5 [6], который поддерживает математические вычисления, визуализацию научной графики и программирование с использованием легко осваиваемого операционного окружения, когда задачи и их решения могут быть представлены в описании, близком к математическим.

Алгоритм получения эквивалентной схемы, осуществляющий исключение заданных узлов, согласно (3), реализован также в программно-вычислительном комплексе СДО-6. Он был использован для верификации рассмотренного матричного алгоритма (см. табл. 2).

Исходная схема сети ЭЭС Кыргызстана включает 816 узлов, 227 связей (ветвей) и 83 генератора. Пропускная способность сети определяется в основном линиями 220–500 кВ, образующими контуры. Сеть 110 кВ и ниже является разомкнутой. В данном расчете эле-

менты сети 110 кВ и ниже представлялись в виде нагрузки. В результате была получена новая расчетная схема ЭЭС Кыргызстана с ВЛ 220–500 кВ, которая включает 144 узла, 154 связи и 13 генераторов. При этом параметры режима ЭЭС в сети 220–500 кВ остались теми же, что и в исходной схеме. Для этой схемы был произведен расчет установившихся режимов с помощью СДО-6 [7]. Далее производилось эквивалентирование расчетной схемы ЭЭС при условии представления нагрузок постоянными проводимостями, и исключения всех узлов, не содержащих ЭДС, т.е. догенераторных узлов, содержащих ЭДС (см. рис. 3).

Агрегированная связь между двумя подсистемами  $I$  и  $J$  характеризуется пропускной способностью, определяемой как в (7) [3, 4].

Применительно к рассматриваемой схеме ЭЭС Кыргызстана в соответствии с рис. 3. пропускная способность между подсистемами севера и юга равна:

$$W_{IJ} = 53,8+80,1+49,7+53,9+67,4+49,5+64,9+43,5 = 462,8 \text{ МВт.}$$

Любая пара узлов эквивалентной схемы оказывается связанной между собой эквивалентной связью, т.е. схема является полным графом, параметры которого показаны в табл. 2.

Сопоставление результатов эквивалентирования схемы матричным алгоритмом и с помощью СДО-6 показывает их совпадение.

Таким образом, пропускная способность связей между севером и югом практически формируется за счет реальных электропередач, соединяющих соответствующие узлы. Остальные связи отражают обобщенное влияние сети в целом на работу соединяемых ими подсистем.

Результаты расчета пропускной способности сечения между северной и южной частями ЭЭС Кыргызстана методом утяжеления установившегося режима [7] в исходной схеме дают практически то же значение, отличающееся в пределах 5%, что указывает на приемлемую точность определения пропускной способности на основе матрицы  $[w_{ij}]$ .

### Литература

1. Системный подход при управлении развитием электроэнергетики / Л.С. Беляев, Г.В. Войцеховская, В.А. Савельев и др. – Новосибирск: Наука, 1980.

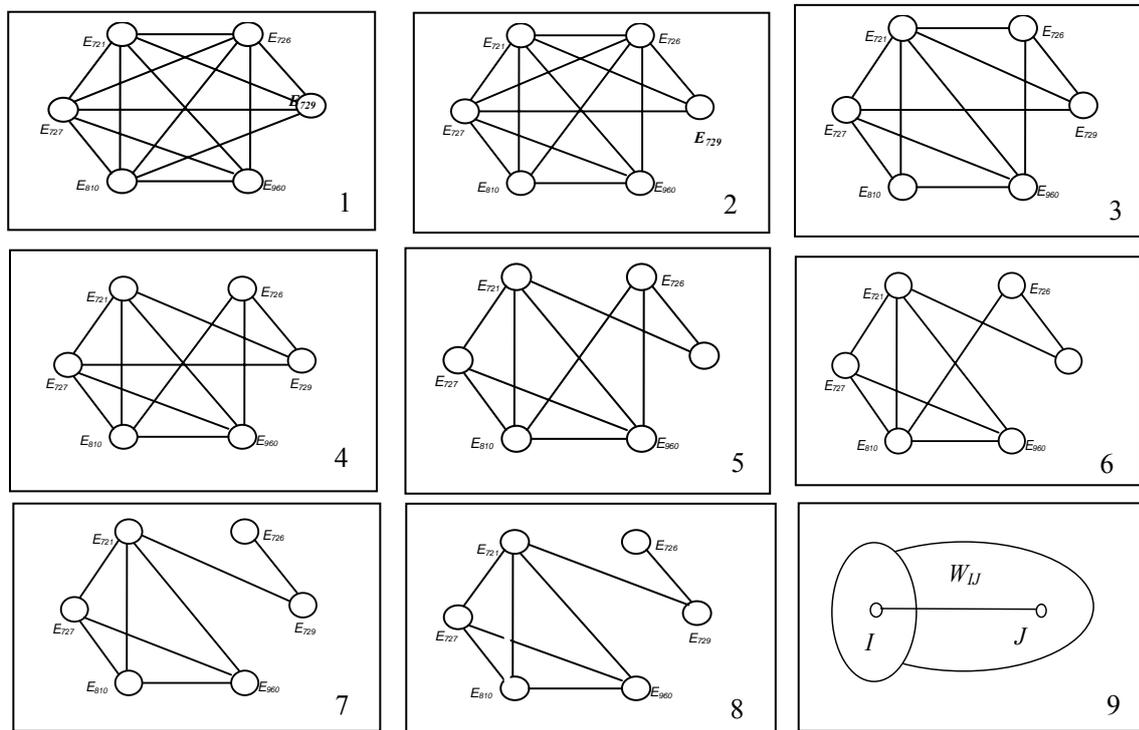


Рис. 4. Процесс иерархической нисходящей классификации – последовательный разрыв связей.

Таблица 2

Параметры сети после эквивалентирования

Номер узла	Модули напряжения, кВ	Фаза напряжения, град.	Мощности нагрузки		Мощности генерации		Провести актив. максим.	Шунтов реактив. максим.
			Актив., МВт	Реакт., МВар	Актив., МВт	Реакт., МВар		
721	228	7,4	664,89	109,67	802	92,59	1	-0,3
726	238,5	2,72	382,41	1,49	290	0	1,3	-0,3
727	508,9	0,67	822,19	-245,86	332	-38,2	0,5	-652,8
729	498	11,91	237,95	-95,66	500	-100	0,2	-3
810	240	3,69	459,74	149,74	655	199,37	3,5	-0,8
960	525	3	260,71	-248,72	250,37	118,12	-1,9	-1300,1

2. Волькенау И.М., Зейлигер А.Н., Хабачев Л.Д. Технико-экономические основы формирования электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1980.
3. Воропай Н.И. Иерархические моделирования при обосновании развития электроэнергетических систем Exponenta Pro // Математика в приложениях. – 2003. – №4(4). – С. 24–27.
4. Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Заславская Т.Б. Структурный анализ электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделен., 1990. – 224 с.
5. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гам и др. – Новосибирск: Наука, 1999. – 256 с.
6. Потемкин В.Г. Введение в MATLAB. – М.: Диалог – МИФИ, 2000. – 247 с.
7. Апиев Н.К. Применение структурного анализа в исследованиях развития ЭЭС Кыргызстана. Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005.