

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЯ ИМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОВАРИАНТНОГО ЭКСПЕРТНОГО ПОДХОДА

М.В. Гродецкий
Институт энергетики АН РМ

Реферат. *Рассматривается способ объединения математических методов с экспертным подходом при решении многовариантных задач развития электроэнергетических систем и задач управления ими. Каждый из вариантов характеризуется набором оценочных критериев, полученных по результатам расчетов оптимального режима математической модели. Решение задачи выполняется заданием множества вариантов и выборкой наилучших из них методами векторной и экспертной оптимизации в интерактивном режиме. Приведен вариант реализации при решении режимных задач транспортных электроэнергетических сетей, работа в системе MS DOS и расширение возможностей при переходе на системное обеспечение современной вычислительной техники.*

Ключевые слова. *электроэнергетические системы, развитие, управление, математические методы, экспертный подход.*

Задачи управления электроэнергетическими системами, и особенно задачи их развития, по своей сути в большинстве случаев являются многокритериальными и дискретными. По своей природе они являются многовариантными, следовательно, оптимизационными. Решение полным перебором всех возможных альтернатив затруднено из-за их огромного числа, а способы ограниченного перебора (методом динамического программирования или методом ветвей и границ) известны не для многих задач. При этом необходимо, чтобы целевая функция была однокритериальной (скалярной), что требует часто недопустимого упрощения задачи. Многокритериальные (векторные) оптимизационные задачи редко могут быть формализованы, так как редко могут быть сформулированы правила предпочтения для всех важных критериев оптимальности. В каждой задаче, если не прибегать к ее большому упрощению, неизбежно присутствует область неопределенности. Например, по ожидаемым нагрузкам могут быть заданы только верхние и нижние пределы, так как поведение потребителей, особенно в условиях рыночной экономики, не может быть формализовано. Расчет цен на энергоносители и электроэнергию не формализуется. Не формализуются и перспективы научно-технического прогресса. Кроме перечисленных есть еще и много других причин, из-за которых не может быть *полноценного* формального решения рассматриваемых задач [1]. Огромная многовари-

антность и дискретность решений, отсутствие скалярной целевой функции являются характерной особенностью рассматриваемых задач, и хотя для некоторых из них при существенном упрощении постановки удается найти формальное решение, для комплексного применения вычислительной техники необходим экспертный подход. В работе рассматривается один из таких подходов.

Постановка задачи. Рассматриваются задачи, в которых объектами исследования являются различные энерготехнические системы (ЭТС), такие как электроэнергетические системы в целом или их отдельные элементы. Ищутся наилучшие варианты их структуры, режимов работы, путей развития. Предполагается решение любых задач, сводимых к рассматриваемой постановке. Это могут быть технико-экономические задачи, задачи расчета нормальных и особых режимов работы, динамических задач и др. Предполагается, что интересующая нас сторона функционирования рассматриваемой ЭТС полностью, независимо от остальных сторон, поддается описанию в виде математической модели.

Математическая модель ЭТС состоит из системы уравнений, в основном нелинейных, и системы неравенств, также часто нелинейных. Состав уравнений определяет вариант структуры ЭТС. Коэффициенты уравнений и неравенств и их переменные являются параметрами режима работы ЭТС. В процессе решения задачи рассматривается множество вариантов решений (альтернатив). Каждая из них определяется заданной структурой - составом уравнений и неравенств - и параметрами - заданными постоянными коэффициентами и переменными, вычисляемыми в процессе расчета режима работы ЭТС. Число переменных должно быть больше числа уравнений. Расчет режима состоит в нахождении точки решения системы уравнений в допустимой для переменных области, заданной системой неравенств. Положение точки решения оказывается произвольным в рамках допустимой области. Такой результат нужен только для ответа на вопрос, есть решение или его нет. Полное решение задачи расчета режима ЭТС (в условиях заданной альтернативы) является в принципе оптимизационным и выполняется одним из методов условного математического программирования [2]. Выбор метода оптимизации зависит от

вида уравнений и неравенств (линейные или нелинейные) и от вида целевой функции (линейная, квадратичная, нелинейная сложной структуры или даже негладкая, невыпуклая и т.д.). Если точное решение получается с большим трудом, приходится довольствоваться приближенным решением, с оценкой области точного решения, так как в процессе решения основной задачи расчет режима является вспомогательной многократно решаемой подзадачей.

Для решения задачи математического программирования требуется скалярная однокритериальная целевая функция векторного аргумента (переменных модели). На деле почти всегда целевая функция является векторной многокритериальной. Ее скаляризация производится построением аддитивной целевой функции в виде линейной «свертки» отдельных компонент со своими весовыми коэффициентами, отражающими компромиссное экспертное решение [3].

В такой постановке могут решаться не только статические задачи, например расчет нормального режима работы электроэнергетической системы, но и динамические задачи. При этом набор переменных состоит из последовательности во времени значений режимных переменных параметров, а целевая функция отражает критерий качества переходного процесса. Это позволяет оптимизировать переходный процесс всего одним оптимизационным расчетом и включать этот расчет как многократно повторяемую подзадачу.

Каждая из рассматриваемых в задаче альтернатив решения характеризуется оценочным вектором критериев - набором численных значений, по которым альтернативы сравниваются между собой. Могут быть и логические критерии со значениями «да» или «нет». Для вычисления этого вектора должны быть исследованы различные режимы функционирования ЭТС в рамках рассматриваемой альтернативы, составляющие тестовое поле режимов. Оно задается описанием набора вариантов изменений структуры и параметров ЭТС в рамках альтернативы, заполняется вычисленными значениями переменных параметров режимов и служит исходной информацией для построения оценочного вектора альтернативы решения задачи. Состав критериев и метод их вычислений зависит от способа сравнения альтернатив между собой. Универсальными являются методы статистической обработки какого-либо из переменных параметров по всему тестовому набору его значений. Критерий может содержать число вариантов тестового набора, в которых выполняется (или не выполняется) какое-либо условие. Построением оценочных векторов всех альтернатив заканчивается первая формализованная (при неформальном задании условий ее работы) часть процесса решения задачи, основанная на методах классической прикладной математики. Это длительный процесс вычисления всех тестовых полей режимов работы ЭТС для всех рассматриваемых в задаче альтернатив. В результате формируется исходное множество альтернатив (ИМА) с оценочными векторами критериев.

Вторая часть вычислительного процесса выполняет первичный выбор альтернатив из ИМА по фор-

мализованным эвристическим методам. Простейшим методом является выбор альтернатив, удовлетворяющих заданным требованиям. Разработка сложных, эффективных эвристических методов может быть основана на теории выбора и принятия решений [4], на работах в области экспертных систем [5]. В области решения задач энергетики, ввиду их большой сложности, пределы совершенствования эвристических методов не ограничены. Эвристически выбранное из ИМА множество альтернатив составляет подмножество ЭМА.

Третья, последняя часть процесса решает задачу неформализуемого выбора альтернатив и работает в интерактивном режиме с экспертом, предоставляя по его запросам всю необходимую ему информацию. Выбранные альтернативы составляют оптимальное множество вариантов решений (ОМА). На его основе составляется отчет о решении задачи. Если эксперт не удовлетворен решением, он может повторить процесс, видоизменив состав исходных альтернатив. Выбор вариантов нельзя выполнять последовательно. Принципиально важна возможность оценки всего множества как единого целого. Это позволяет анализировать зависимость изменения оценочных показателей от изменения условий формирования альтернатив и прогнозировать изменения условий, улучшающие показатели.

Участие эксперта необходимо при подготовке вычислительного комплекса к решению задачи, так как он должен подобрать состав критериев оценочного вектора и способы их вычисления, эвристический метод предварительного выбора, содержание и формы представления информации, необходимой ему в процессе решения задачи.

Вариант реализации. Схема процесса решения задачи приведена на рисунке 1. В качестве ЭТС берется электроэнергетическая система. Рассматриваются нормальные режимы ее работы. Математическую модель ЭТС (рис.1, блок 5) образуют: система узловых балансовых уравнений, статические характеристики узловых нагрузок, расходные (стоимостные) характеристики источников энергии (электростанций, перетоков), область допустимых решений. Система балансовых уравнений состоит из линейных уравнений токов в линиях передач и нелинейных уравнений узловых балансов. Введение токов линий в общее число переменных делает удобным учет ограничений. Область допустимых решений задается равенствами, фиксирующими некоторые параметры или выражения, например мощности линий или суммарные перетоки, и простыми ограничениями на основные и дополнительные переменные. Последние возникают при замене равенствами неравенств, заданных в виде формул. Энергосистема разбита на районы с возможностью задания районных характеристик, например перетоков мощности или районных характеристик целевой функции. Параметры базисного варианта состояния математической модели (рис.1, блок 4) задаются в таблицах узлов, линий, электростанций, внешних перетоков и районов. Здесь же задается базисная структура модели энергосистемы. Число переменных (вычисляемых парамет-

ров) превышает общее число уравнений. Поэтому расчет режима (рис.1, блок 3) является принципиально оптимизационной задачей, кроме случаев, когда нас интересует только сам факт существования режима в любом месте отведенной области. Рассматривается двухкритериальная целевая функция: по минимуму отклонений узловых напряжений от нормативных значений (качество энергоснабжения) и по минимуму затрат (минимуму потерь или минимуму стоимости электроэнергии при разностоймостных источниках). Компромисс между критериями (их весовые коэффициенты) задает эксперт.

Описание альтернатив, составляемое экспертом, задает отличия в структуре и параметрах альтернатив от базисного варианта математической модели и записывается в таблицах, аналогичных таблицам базисного варианта (рис.1, блок 8). Здесь же задаются весовые коэффициенты целевой функции, которые могут не быть одинаковыми во всех альтернативах. Состав вычисляемых параметров (переменных) во всех альтернативах одинаков и равен базисному составу. Условия формирования тестового поля вариантов режимов, необходимого для построения оценочного вектора (рис.1, блок 6), одинаковы для всех альтернатив и могут быть представлены в виде двухмерной матрицы. Одно ее измерение задается областью неопределенности: минимумом и максимумом нагрузки энергосистемы и шагом, с которым надо этот интервал просмотреть. Ее второе измерение задается тестом. В зависимости от решаемой задачи тесты могут быть различными. Например, суточным графиком нагрузки или её годичной характеристикой. При рассмотрении вопросов безопасности (схемной надежности) тест может задавать различные конфигурации сети и различные составы источников энергии, возникающие при чрезвычайных и аварийных ситуациях. Расчет всех заданных матрицей позиций тестового поля вариантов режимов дает информацию для формирования оценочного вектора альтернативы. Состав критериев и способ их вычисления зависит от эксперта и решаемой задачи. Стандартной может быть статистическая обработка заданного параметра по всему множеству его значений в тестовом поле вариантов. Например, статистическая характеристика напряжений узлов, токов в линиях, потерь по районам, стоимости энергии. Критерием может быть число допустимых режимов во всех вариантах поля. Исходное множество альтернатив (ИМА) (рис.1, блок 10) заполняется всеми вычисленными оценочными векторами. На этом заканчивается формализованная первая часть процесса решения задачи, основанная на методах классической прикладной математики.

Вторая часть, также формализованная, основана на эвристических методах. В ней по заданным условиям (рис.1, блок 11) производится эвристический выбор (рис.1, блок 13) подмножества альтернатив ЭМА (рис.1, блок 12) из исходного множества ИМА. Простейшим является выбор альтернатив, чьи критерии удовлетворяют заданным ограничениям, например чтобы число допустимых режимов было не ниже заданного процента, или чтобы среднеквадратическое отклонение напряжений от нормативных

значений не превышало заданной величины. Алгоритмы эвристического выбора зависят от эксперта и типа решаемой задачи.

Первые две части процесса решения задачи выполняются автоматически. Предварительно, в соответствии с типом решаемой задачи и указаниями эксперта, программист (рис.1, блок 2) вносит изменения в некоторые программы, а администратор базы данных (рис.1, блок 1) - в форматы таблиц. Условия расчетов вносятся экспертом оперативно.

Третья часть решения задачи работает с экспертом (рис.1, блок 19) в интерактивном режиме (рис.1, блок 17). Ее задачей является предоставление эксперту по его требованию любой необходимой ему информации (рис.1, блок 15). Во время работы первых двух частей решения задачи в базе данных запоминается вся исходная информация и все результаты, и предусматривается способ ее вывода в удобных формах. Из эвристически отобранного множества альтернатив ЭМА эксперт выбирает оптимальные на его взгляд альтернативы и помещает их в подмножество оптимальных альтернатив ОМА (рис.1, блок 14). По этому подмножеству может быть составлен внешний отчет (рис.1, блоки 16,18). Если эксперт не удовлетворен сделанным выбором, он может повторить весь процесс решения задачи, изменив в базе данных состав ИМА и другие условия расчета. Если может потребоваться возврат к результатам предыдущих решений задачи, соответствующую информацию можно записать в базе данных.

Рассмотренный способ может применяться при решении одношаговой задачи, когда надо найти разовое оптимальное изменение ЭТС. При рассмотрении многошагового процесса во времени, то есть процесса развития ЭТС, строится дерево вариантов. Каждому варианту очередного шага сопоставляется набор вариантов продолжения на следующем шаге. После последнего шага образуется исходное множество альтернатив, число элементов которого будет порядка числа вариантов продолжения в степени числа шагов. Этот полный перебор вариантов продолжения сокращается, если можно предположить Марковский процесс: выбор варианта продолжения не зависит от предыстории, или эта предыстория может быть учтена экспертом. Тогда можно применить метод динамического программирования. Число вариантов не возрастает, число альтернатив во всех шагах одинаково, на каждом шаге решается описанная одношаговая задача, в которой экспертом выбирается лучший вариант продолжения. Многошаговая задача существенно упростится, если могут быть построены альтернативы в виде сценариев развития: априори определяются варианты продолжения по шагам каждой из альтернатив. Задача становится одношаговой, но увеличивается тестовое поле вариантов режимов, необходимое для построения оценочных векторов альтернатив. Условия его формирования могут быть представлены трехмерной матрицей, с добавлением вариантов продолжения временного процесса. При таком подходе увеличивается время счета, но не увеличивается объем ИМА.

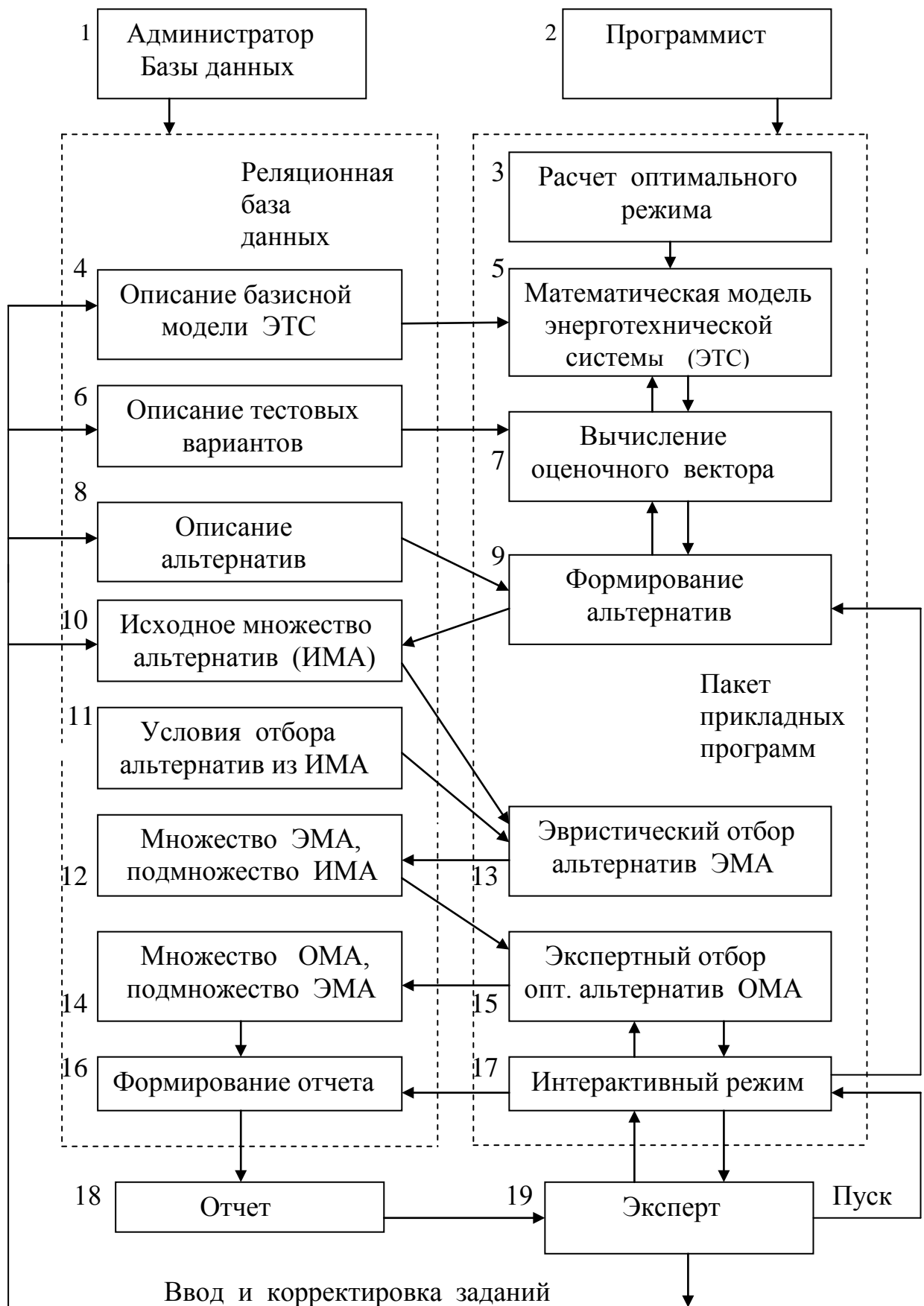


Рис.1. Схема процесса решения многовариантной задачи оптимизации энерготехнической системы

Время решения задач, особенно задач развития, может быть значительным, но приемлемым для исследовательских задач. Это время можно сократить, если начинать с грубого расчета при небольшом тестовом поле вариантов режимов для построения оценочных векторов альтернатив и увеличивать тестовое поле по мере того как число альтернатив экспертного отбора будет уменьшаться.

Заключение. Для решения рассмотренных задач должен создаваться вычислительный комплекс, состоящий из реляционной базы данных и пакета прикладных программ, интегрированного с базой данных. Комплекс оперативно обслуживается администратором базы данных и программистом. При необходимости это могут быть группы лиц. Этот вычислительный комплекс не может быть законченным продуктом. В процессе его эксплуатации он должен постоянно модифицироваться, и вот почему.

Математическая модель рассматриваемой ЭТС может превышать наличные вычислительные возможности. В таком случае она упрощается (эквивалентизируется), но после этого она описывает ЭТС приближенно и в рамках суженной области допустимых значений переменных. Поэтому естественно стремление совершенствовать математическую модель и решать задачи на более совершенной вычислительной технике. Неизбежно стремление к более полному и более оперативному решению задачи, к совершенствованию вычислительных методов как математических, так и особенно эвристических. Накопление опыта работы экспертов приводит к необходимости замены одних эвристических методов другими и к развитию формы интерактивного взаимодействия. Кроме того, у различных экспертов могут быть различные методы работы, и может быть полезным иметь возможность сравнивать их решения. Все это и многое другое требует легкой модифицируемости вычислительного комплекса. Этого можно достигнуть применением метода объектно-ориентированного программирования с использованием современных средств программирования. Кроме требования легкой модифицируемости есть требование легкого тиражирования комплекса для решения существенно разных задач. Эта работа облегчается и ускоряется при использовании единой структуры для всех создаваемых комплексов и, по возможности, единого интерфейса между блоками – объектами. Надо стремиться к тому, чтобы блоки, выполняющие в разных комплексах одинаковые функции, хоть и разными методами, имели одинаковый интерфейс. Этого добиться не легко, но по мере накопления опыта программирования это может оказаться осуществимым.

В Лаборатории режимов энергосистем Института энергетики разрабатывались методы, алгоритмы и программы, обеспечивающие математическую часть расчета оптимальных режимов работы энерготехнических систем: энергоблоков и блочной электростанции, теплофикационных энергоблоков, электроэнергетических сетей и систем. Разработаны методы, алгоритмы и программы условного нелинейного математического программирования [6] и решения

многокритериальной задачи оптимизации как скалярной, с аддитивной по критериям целевой функцией [7]. Решались некоторые практические задачи в многовариантной постановке. Однако все программирование велось в рамках узких возможностей операционной системы MS DOS. Число узлов электросети не превышало 500, использовалась база данных с ограниченными возможностями, практически отсутствовал интерактивный режим. Сейчас начал переход на системное обеспечение современных вычислительных машин и методы объектно-ориентированного программирования, что позволит создать полноценный вычислительный комплекс. Число узлов электросети может быть увеличено до тысяч, современная СУБД позволит хранить всю необходимую информацию, интегрировать необходимые прикладные программы и работать в удобном интерактивном режиме. Комплекс можно будет легко модифицировать под различные постановки задач. Все это позволит решать прикладные задачи энергетического комплекса Молдавии.

[1] Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л., *Модели оптимизации развития энергосистем*, «Высшая школа», Москва, 1987, стр.272.

[2] Поляк Б.П. *Введение в оптимизацию*, «Наука», Москва, 1983, стр. 384

[3] Кини Р., Райфа Х. *Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения*, «Радио и связь», Москва, 1981, стр.560.

[4] Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. *Теория выбора и принятия решений*, «Наука», Москва, 1982, стр.327.

[5] Джексон П. *Введение в экспертные системы*, Издательский Дом «Вильямс», Москва, 2001, стр. 622.

[6] Гродецкий М.В. *Прикладной метод условного нелинейного программирования*, «Труды Института энергетики Академии наук Республики Молдова», Типография Академии наук, Кишинев, 1996, стр.12.

[7] Гродецкий М.В., Денисенко В. Г., Чиник М. А. *Расчет режима работы электроэнергетической системы как экспертная задача*, Сб. трудов третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Благовещенск, 2003, стр.6.



Гродецкий Михаил Викторович, *1935, город Кишинев, инженер-электрик. Закончил электротехнический факультет Чешского политехнического института в Праге, по специальности «измерительная техника и автоматика». Работал в области автоматизации технологических процессов. С 1963 года работает в Отделе энергетической кибернетики, позже Институт энергетики Академии Наук Молдавии в области «электроэнергетические сети и системы и управление ими».