

# Планирование роста энергетических систем

---

А.Ж. Коваррубиас

## ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия настолько не отделима от мировой экономики, что отдельные ее показатели используются для выражения экономического развития страны (потребление или производство электроэнергии на душу населения) и уровня жизни населения (потребление электроэнергии на душу населения в стране). Кроме того, снабжение электроэнергией имеет свои особенности, что делает эту отрасль производства уникальной по сравнению с другими отраслями промышленности. Конечный продукт должен поставляться сразу, автоматически по запросу потребителя; за исключением гидроаккумулирующих станций и электроаккумулирующих батарей, нет никакой другой технологии, с помощью которой можно производить электроэнергию экономно по одинаковым расценкам, хранить ее в больших количествах и поставлять ее по удобному графику; недостаточная мощность (нехватка) или избыточная мощность (холостая мощность) оказывают отрицательное воздействие на экономику; тесная взаимосвязь с экономическими и социальными факторами влияет на эту проблему с точки зрения трудовых и материальных затрат, защиты окружающей среды и т.д. Поэтому тщательное планирование энергетического сектора имеет важное значение, так как принимаемые решения связаны с распределением крупных ресурсов, потенциально таящих серьезный экономический риск для компаний, производящих электроэнергию, и для всей экономики в целом.

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Планирование энергетической системы является частью более общей проблемы, связанной с планированием энергетического и экономического развития. Поэтому цель планирования состоит в том, чтобы определить, как в перспективе при наименьших затратах нарастить мощности системы производства, передачи и распределения электроэнергии, достаточной для того, чтобы обеспечить прогнозы ее потребления в рамках технико-экономических и политических ограничений.

Традиционно, планирование энергетической системы в основном связывается с планированием роста производства электроэнергии. Главным образом это происходит в силу того, что капиталовложения на строительство линий передач представляют собой относительно небольшую часть от капиталовложений на строительство

---

Г-н А.Ж. Коваррубиас является сотрудником Секции экономических исследований Отдела ядерной энергетики и реакторов.

электростанций, и что капиталовложения на распределение электроэнергии среди потребителей, хотя и довольно значительные, в основном не зависят от системы производства и передачи электроэнергии.

Основные этапы планирования энергетической системы можно кратко изложить следующим образом:

- a) Изучение прогноза потребления электроэнергии на последующие 5-30 лет на основании наиболее надежной информации.
- b) Оценка энергетических ресурсов в будущем для производства электроэнергии и вероятные направления технико-экономического развития.
- c) Оценка экономических и технических характеристик, существующей системы энергоблоков и станций, которые рассматриваются в качестве потенциальных блоков для расширения энергосистемы. В эти характеристики включаются затраты на капиталовложения, стоимость топлива, стоимость эксплуатации и технического обслуживания, коэффициенты полезного действия, время строительства и т. д.
- d) Определение технических и стоимостных характеристик станций, на основе которых возможно расширение энергосистемы.
- e) Определение экономических и технических параметров, влияющих на принятие решения, а именно: учетная ставка, уровень надежности, предъявляемый к системе по производству электроэнергии и т. д.
- f) Выбор процедуры для определения оптимальной стратегии расширения в рамках существующих ограничений.
- g) Количественное рассмотрение результатов с целью оценки целесообразности предложенного решения.

При определении большинства из этих данных необходимо учитывать существующие и будущие экономические и технические условия, в рамках которых предполагается функционирование электроэнергетического сектора. Таким образом, имеющиеся ресурсы и цены на топливо связаны с энергетической политикой страны; политика экономического развития, существующего и предполагаемого, должна рассматриваться с точки зрения прогноза спроса; процентная ставка и нормы эскалации цен также зависят от экономики; приемлемая надежность системы должна быть нацелена на будущее.

В связи с тем, что вопросы расширения электроэнергетической системы связаны с различными переменными, плановики разработали много математических моделей для системного подхода к решению [1], [2].

## **ПРОГРАММА ВАСП ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РОСТА СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

За последние несколько лет МАГАТЭ оказало помощь многим развивающимся государствам-членам по проведению исследования планирования электроэнергетической системы с использованием компьютерной программы под названием ВАСП (Венская автоматическая система планирования) [3]. Эта программа дает возможность определить наиболее экономичный график ввода новых мощностей производ-

ства электроэнергии в энергосистему в близком и отдаленном будущем и представляет собой второе поколение ранней программы планирования энергетической системы, разработанной управлением "Теннесси Вэллей" в США. Программа нацелена на поиск "оптимального" плана роста энергосистемы в рамках заданных ограничений. Слово "оптимальное" означает, что движение учитываемой денежной наличности (капитальные и эксплуатационные расходы) сводится к минимуму в течение определенного периода времени и закладывается также резерв обеспечения, чтобы уменьшить эффект неопределенности за пределами этого периода. Этот расчет осуществляется с помощью динамического программирования. Динамическое программирование, в самых общих чертах, является идеальным методом решения проблемы планирования системы. Однако даже в условиях ограниченных вариаций планов возможного роста системы этот подход является непрактичным без использования ЭВМ. Учитывая далее наличие разнообразных блоков, производящих в настоящее время электроэнергию, число возможных планов роста столь велико, что даже с помощью ЭВМ общее динамическое программирование является непрактичным.

Программа ВАСП представляет собой определенный компромисс. Специалист по планированию систем может направить область исследования на выбор конфигураций, которые он считает наиболее экономичными, но программа даст ему ответ, мешают ли его ограничения принятию решения. Затем, ВАСП дает ему возможность модифицировать свои ограничения и без повторения всех предыдущих расчетов определить эффект модификации. Этот процесс можно повторять до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение, которое отвечает ограничениям, налагаемым потребителем.

Пакет программ ВАСП состоит из следующих семи модульных программ:

1. Программа, описывающая прогноз пиковых нагрузок и кривых продолжительности нагрузки на систему (LOADSY) .
2. Программа, описывающая существующую энергосистему и все будущие наращивания и сокращения мощности, которые четко запланированы (FIXSYS) .
3. Программа, описывающая вероятные станции, которые могли бы быть использованы для расширения энергосистемы (VARSYS) .
4. Программа для построения альтернативных конфигураций расширения системы (CONGEN) .
5. Программа для определения, была ли опробована определенная конфигурация и, в отрицательном случае, для имитирования работы этой конфигурации (MERSIM) .
6. Программа для определения оптимального графика ввода новых энергоблоков в систему в течение интересующего периода времени (DYNPRO) .
7. Программа, суммирующая входные данные, результаты исследования и требования к движению наличных средств для принятия оптимального решения (REPROBAT) .

По каждой из первых трех программ создаются файлы данных, которые используются при расчетах. Дополнительные файлы создаются за счет четвертой и пятой программ и используются в шестой программе. По каждой программе подготавливается печатное резюме. Седьмая программа дает отчет об исследовании.

Прямое преимущество подхода с использованием модульной программы заключается в том, что первые три программы могут осуществляться самостоятельно, чтобы избежать суммарных ошибок в данных. Эти программы обрабатываются быстро, тем самым имеется возможность избежать чрезмерно длительного прогона программы с неправильными данными. Отделение программы, генерирующей конфигурации роста энергосистемы, от программы, осуществляющей моделирование, дает возможность дальнейшей дополнительной экономии машинного времени, поскольку те конфигурации роста, которые могли вызвать ошибки в данных в генерирующей программе, можно исключить из моделирования. Возможность иметь результаты моделирования в файле данных является основной экономящей время чертой программы. Во время поиска варианта, лишенного ограничений, с помощью следующих друг за другом повторных прогонов последних трех программ, выполняется лишь такое моделирование, которое не проводилось до этого. Поскольку при рассмотрении конфигурации роста основное время занимает моделирование, машинное время, сэкономленное на расчетах, может быть весьма существенным.

Вторым преимуществом модульной концепции является то, что объем памяти, требуемой в каждый конкретный период времени, может быть сокращен, что в свою очередь позволяет использовать относительно малые машины. Это имеет особое значение тогда, когда мы считаем, что помощь МАГАТЭ государствам-членам заключается в передаче методологии ВАСП.

Интересной чертой программы является то, что ее надежность и расходы по подготовке ежегодных конфигураций системы рассчитываются с помощью вероятностных методов. Отсюда, стохастические переменные, такие, как наличие воды для гидроэлектростанции или плановое или внеплановое отключение тепловых электростанций, обрабатываются с помощью вероятностных методов. Таким образом, результаты, полученные по программе, исключают неопределенности в отношении влияния этих стохастических переменных на план оптимального роста.

В этой связи отключение теплоэлектростанций выражается как запланированная потребность в техническом обслуживании (запланированный простой) и вынужденный простой (не запланированный простой). В случае гидроэлектростанций потребитель может указать необходимое количество периодов времени в году (в сезонах) для того, чтобы охарактеризовать наличие воды. Более того, имеется также возможность указать, с вероятностью проявления каждого условия, до пяти различных гидроусловий, а именно: исключительно засушливый год, засушливый год, нормальный год, влажный год, очень влажный год. Это имеет большое значение для систем с большой составляющей гидроэнергии в условиях изменчивых гидрологических условий.

В рамках ограничений по памяти ВАСП может рассматривать систему по следующим параметрам:

- 30 лет изучаемого периода; каждый год разбивается на отдельные периоды (1–12).
- 5 наборов гидрологических условий.
- 100 многоблочных станций в существующей системе, с обычными гидроэлектростанциями, аварийными гидроэлектростанциями и гидроаккумулирующими стан-

циями, если таковые существуют, причем каждая рассматривается как единая законченная станция. Однако этот предел в 100 гидростанций следует сократить на число возможных типов станций, используемых для роста системы (читай ниже).

- 20 возможных типов станций для роста системы. Кроме теплоэнергоблоков в перечень альтернативных вариантов могут быть также включены гидроэлектростанции и гидроаккумулирующие станции. Если программой рассматривается серия гидростанций или гидроаккумулирующих станций, то станции обоих типов следует идентифицировать в хронологическом порядке так, как они будут вводиться в систему. В перечень можно включить до 20 таких проектов. По мере подключения в систему гидростанций или гидроаккумулирующих станций, они сливаются с существующими гидроэлектро- или гидроаккумулирующими станциями. Поэтому все гидростанции рассматриваются в качестве одной альтернативной станции, и все гидроаккумулирующие станции рассматриваются в качестве дополнительной альтернативной станции.
- 200 альтернативных конфигураций системы в год с пределом до 2000 конфигураций на один исследовательский период за один прогон ЭВМ.

Машинное время, требуемое для осуществления исследования по планированию, будет зависеть от сложности моделируемой системы, от числа рассматриваемых гидрологических условий, от числа лет, включенных в период исследования, от числа периодов, на которые подразделяется год, от общего количества конфигураций, получаемых за один прогон и, наконец, от требуемой точности моделирования. Существующий вариант программы ВАСП-II включает некоторые письменные выписки на языке ASSEMBLER для сокращения требуемого машинного времени.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММЫ ВАСП

Цель изучения планирования электроэнергетической системы состоит в том, чтобы определить оптимальный характер роста системы с целью удовлетворения электроэнергетических потребностей страны в течение определенного периода. Изучение планирования ядерной энергетики, как, например, изучение, осуществляемое МАГАТЭ по просьбе различных государств-членов [4], [5], [6], [7], [8], [9], выполняется с той же самой целью, но при этом особый упор делается на оценку возможной доли ядерной энергетики в общем характере роста энергосистемы. В идеальном случае осуществление этой работы потребует оценки и сравнения выгоды и затрат, как прямых, так и косвенных, в результате развития альтернативных схем, с тем, чтобы определить план энергетического развития, дающий максимальные общие чистые выгоды. Из-за ограничений по времени неизбежно приходится прибегать к ряду упрощенных предпосылок. Методология, используемая программой ВАСП, представляет собой попытку достижения компромисса между практическими ограничениями и теоретической состоятельностью.

Основные компоненты этой методологии включают следующее:

- а) Определение затрат и предполагаемой выгоды и развитие методов оценки их количественных значений.

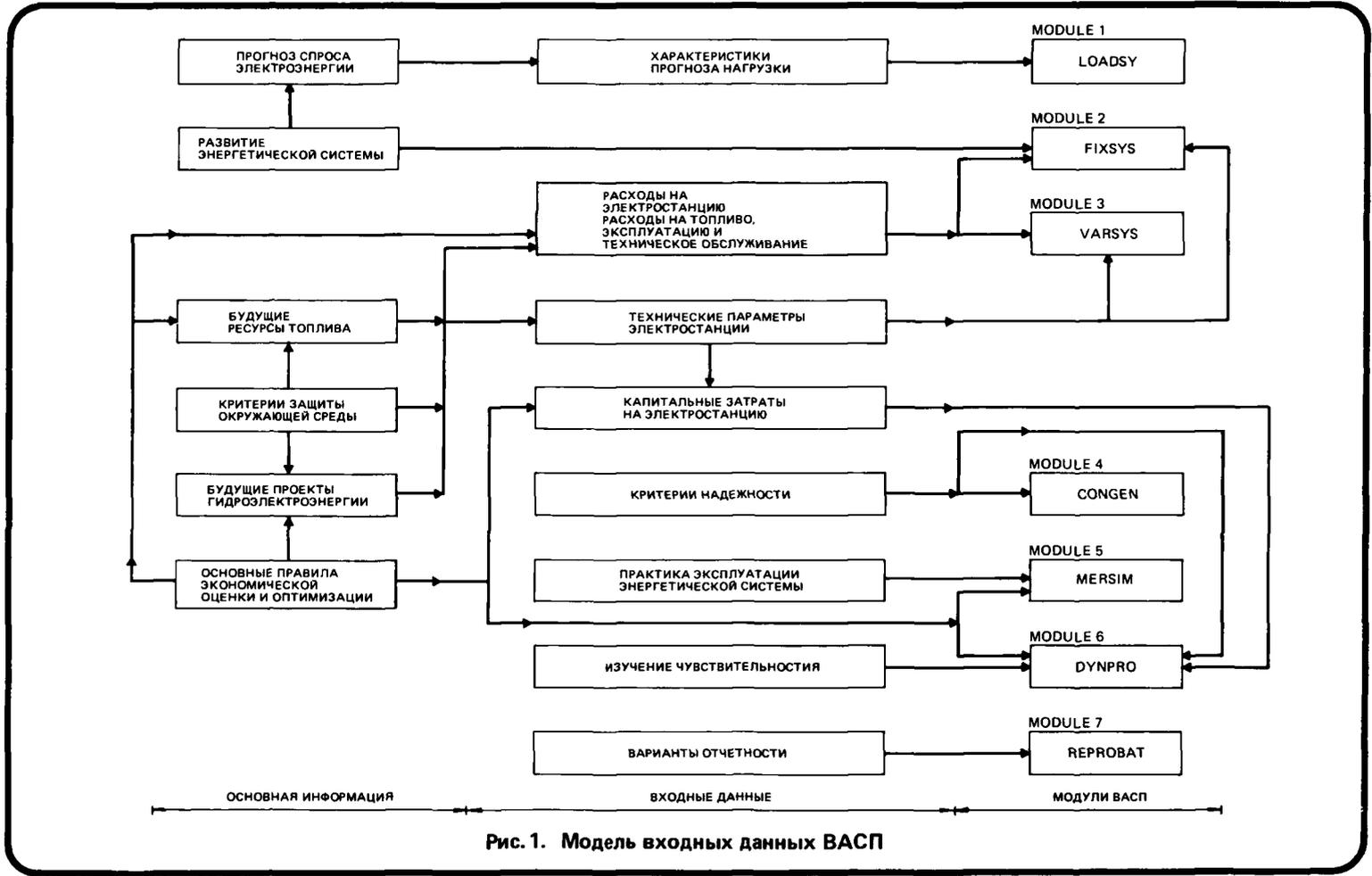


Рис. 1. Модель входных данных ВАСП

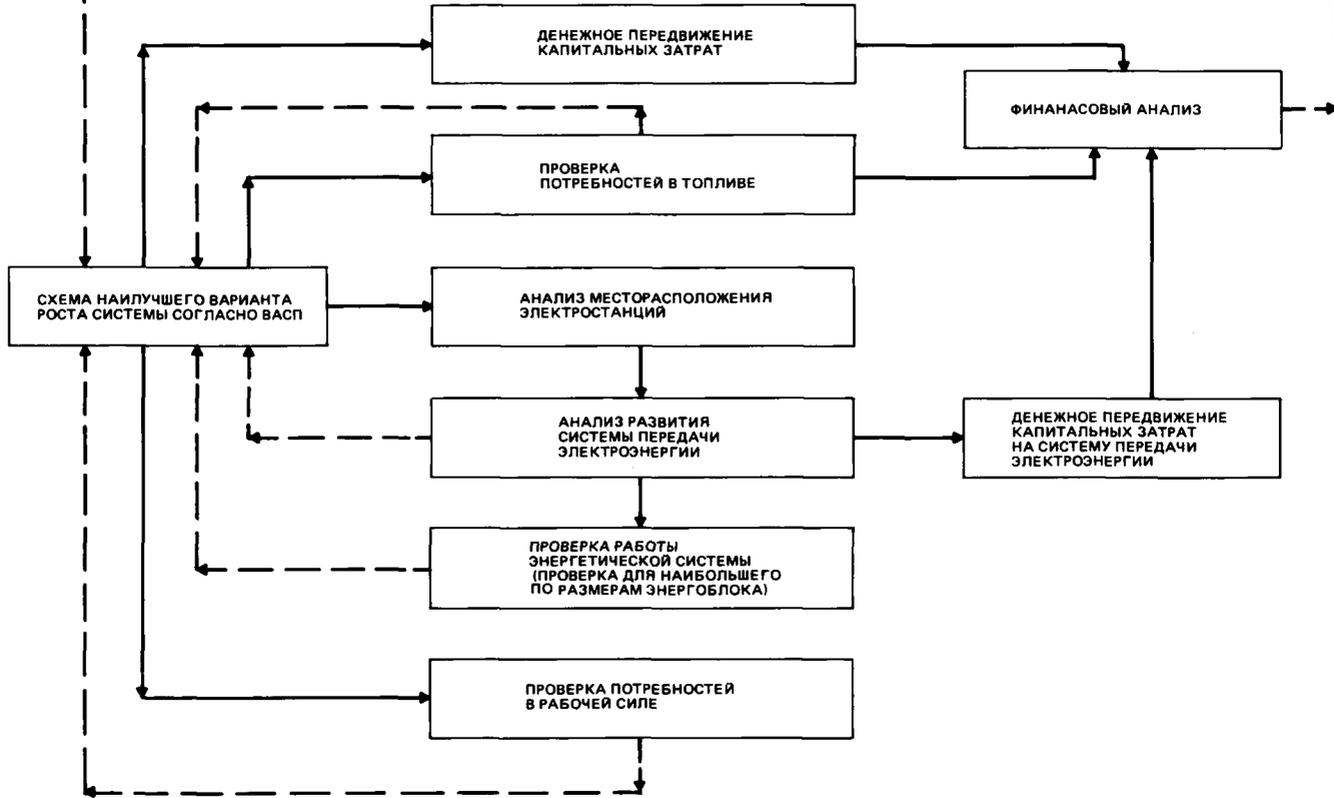


Рис. 2. Анализ выходных данных ВАСП

- b) Выбор критериев для сравнения выгоды и затрат на протяжении определенного периода времени с указанием внутренней и иностранной валютной составляющей в переменных пропорциях.

Предполагается, что основным показателем являются скорее расходы, а не чистая выгода. Исключительно важно предполагать, что все программы роста электроэнергетической системы, отвечающие проектируемому спросу с учетом присущих ограничений с точки зрения надежности, дают одинаковый общий итог с точки зрения выгоды и что наименее дорогостоящая программа в конечном итоге наиболее приемлема для конечных потребителей. В случае сравнения альтернативных методов производства одного и того же продукта, а в данном случае электроэнергии, это является наименее спорным вопросом в отличие от общего случая сравнения различных проектов с неодинаковыми конечными продуктами. Однако в данном случае не учитываются такие косвенные эффекты, как, например: 1) различные уровни занятости в результате различия в энергетических программах и их последующие эффекты на экономию и капиталовложения и 2) будущая стоимость приобретения источника рабочей силы, имеющего навыки в строительстве и эксплуатации атомных электростанций.

Во внимание принимаются только затраты, непосредственно связанные с производством электроэнергии определенным типом электростанции. В частности, такие дополнительные затраты, которые образуются в результате растущего загрязнения окружающей среды в случае с тепловыми электростанциями или в результате относительно большего теплового загрязнения, создаваемого атомными электростанциями, не принимаются во внимание в основном анализе. Наложение жесткого контроля в целях защиты окружающей среды в промышленно развитых странах, ведущее к более высоким капитальным затратам и затратам на топливо для тепловых электростанций, свидетельствует о том, что "внешние" затраты могут легко стать "внутренними" с течением времени.

Во всех случаях расходы определяются как расходы на всю экономику, а не расходы, которые несут производители электроэнергии. Основное следствие этого критерия состоит в том, чтобы исключить налоги на все виды топлива и оборудования из расходов на производство энергии. Это является особенно существенной посылкой для тех стран, которые облагают тяжелым налогом некоторые виды топлива и, в частности, нефть. Поскольку эти страны являются наилучшими судьями своей налоговой политики, куда могут войти статьи, связанные с социальными благами, которые не принимаются во внимание в настоящем исследовании, и поскольку компании, производящие электроэнергию, без сомнения рассматривают налоги на топливо и оборудование в качестве элементов стоимости, для случаев, которые могут отразить принципиальную разницу в результатах, можно провести альтернативные расчеты, приняв налоги в качестве элементов стоимости.

Обобщение затрат во внутренней и иностранной валюте осуществляется на основании официальных обменных курсов, действующих на время проведения исследования. Предполагается, что для многих стран официальный обменный курс в некотором роде является условным и не учитывает полностью наличие иностранного капитала и спроса на него. Свидетельством этому является существование ратифицированного и контроля иностранной валюты и существование параллельных рынков. Хо-

тя подобный подход может в значительной степени недооценить истинное значение соотношения затрат в иностранной и внутренней валюте, альтернативные предположения будут иметь такие же неопределенности.

Что касается выбора валюты, которая играла бы роль общего знаменателя, то в целях удобства, и отнюдь не по причине особой надежды на его стабильность, был выбран доллар США.

Обобщение и сравнение расходов с течением времени осуществляется посредством учета их существующего денежного значения по норме, которая принимается в качестве постоянной во времени. Этот принцип предполагает принятие двух решений:

- a) Выбор существующей стоимости в качестве критерия. Это решение должно быть оценено в сравнении с возможной альтернативой, а именно в сравнении с различными схемами развития по их внутренней норме прибыли. Последнее, однако, полностью исключается, поскольку, если не считать теоретических погрешностей при сравнении взаимноисключающих проектов, для принятия такого решения необходимо оценить выгоду, а это не является целью исследования.
- b) Предположение относительно того, что учетная норма остается постоянной с течением времени, может подвергаться критике, поскольку этот показатель должен в принципе медленно снижаться по мере достижения более высоких уровней экономического развития и более крупных мощностей капитального оборудования. Однако представляется, что практические трудности, связанные с оценкой и использованием изменяющихся учетных норм, значительно перевешивают возможные преимущества.

В заключение, учетные ставки и инфляция объединяются в единый эквивалент учетной ставки. Это в значительной степени упрощает работу по расчетам, поскольку позволяет продолжать вычисления на основе постоянных цен.

Этапы изучения роста энергетической системы с помощью программы ВАСП указаны схематично на рисунке 1 и 2. Кратко они заключаются в следующем:

1. Корреляция исторических данных, которые могут быть использованы для прогнозирования будущего спроса на электроэнергию.
2. Выбор прогноза пикового спроса, который будет использоваться в качестве основы для изучения и определения формы кривых продолжительности нагрузки.
3. Определение характеристик существующих электростанций или предназначенных для рассматриваемой электроэнергетической системы.
4. Определение характеристик электростанций, которые могут рассматриваться в качестве альтернатив для роста энергосистемы.
5. Оценка роли местных энергетических источников, таких, как угля, газа и гидроэнергии.
6. Определение экономических данных и параметров, которые будут использоваться.
7. Определение приблизительного размера самого крупного энергоблока, который система может принять с точки зрения соображений частотной стабильности и линий передач.

8. Определение оптимальных (минимальных) затрат на осуществление программы роста энергосистемы.
9. Определение чувствительности результатов к изменениям экономических данных.
10. Оценка финансовых потребностей для выбранной программы роста энергетической системы.
11. Проверка системы передачи и эксплуатационных ограничений.
12. Проверка финансовых ограничений.
13. Проверка других ограничений, а именно строительных мощностей и т. д.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВАСП

Традиционный метод сравнения экономики атомных и обычных электростанций заключался в том, чтобы рассчитать стоимость производства электроэнергии для различных типов станций, используя соответствующие данные по капитальным затратам, эксплуатационным расходам и топливной составляющей наряду с предполагаемым коэффициентом нагрузки станции и стоимостью денег. Этот подход был достаточным до последних лет, в связи с тем, что выбор оборудования для производства электроэнергии, имеющегося в распоряжении компаний по производству энергии, был достаточно ограниченным. Во многих случаях требовалось лишь сравнить атомные и обычные энергоблоки определенного размера, причем их размер выбирался интуитивно, в зависимости от размера системы. Для такого подхода обычно было достаточным произвести простейшие расчеты.

Вышеуказанный метод планирования энергетической системы в настоящее время представляется неприемлемым по ряду причин. Во-первых, выбор энергоблоков намного шире и включает газовые турбины, гидроэлектростанции, гидроаккумулирующие станции, различные типы тепловых станций и даже различные типы атомных станций. Во-вторых, исходя из крупных капиталовложений, выбор блока оптимального размера становится весьма важным. В третьих, положение электростанции в сети нагрузки влияет на мощностные факторы, и сравнение альтернатив, использующих мощностной фактор, могут быть ошибочными. И, наконец, в связи с высокой стоимостью ископаемых видов топлива, и, в особенности, импортируемого газа и нефти, с экономической точки зрения необходимо снизить общие затраты на систему, учитывая не только существующие электростанции, но также электростанции, которые могут быть введены в будущем. Использование ВАСП позволяет учесть все эти факторы. Другое преимущество использования системы ВАСП состоит в вероятностном подходе к производству энергии за счет гидроэнергетики и за счет наличия тепловых электростанций, тем самым исключаются неопределенности, присущие тем моделям, которые рассматривают детерминистский подход к этим случайным переменным.

## ПЕРЕДАЧА ПРОГРАММЫ ВАСП В РАСПОРЯЖЕНИЕ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ МАГАТЭ

Агентство передало программу ВАСП 38 странам, которые согласились с определенными условиями передачи, и 5 международным организациям. В общей сложности 16 стран обратились к Агентству с просьбой о подготовке персонала в ис-



**Рис. 3.** На учебные курсы по программе ВАСП, проведенные с 14 февраля по 14 апреля 1978 года в Аргонне, США, собралось 16 участников из 5 стран. На фотографии вы их видите вместе с организаторами курсов и лекторами.

пользовании методологии ВАСП в течение 1974-1977 годов, в результате чего в различные периоды времени в Вене получили подготовку 34 инженера. Необходимость во многих государствах-членах дальнейшей специализированной подготовки кадров в планировании роста электроэнергетической системы с использованием программы ВАСП привело Агентство к необходимости организации серии учебных курсов по этому вопросу. Два подобных учебных курса были проведены в Аргонской национальной лаборатории, США, в течение девяти недель в начале 1978 и 1979 годов, в которых приняло участие 40 участников из 18 стран. Ввиду успеха этих курсов, в будущем планируется проведение учебных курсов по планированию роста электроэнергетической системы с использованием методологии ВАСП.

#### Литература

- [1] Dennis Anderson, "Models for determining least-cost investment in electricity supply", The Bell Journal of Economics and Management Science, Vol. 3, No. 1, Spring 1972.
- [2] H. Balériaux, E. Jamouille, F. Linard de Guertechin, "Simulation de l'exploitation d'un parc de machines thermiques de production d'électricité couplé à des stations de pompage", Review E, Suppl. Bull. Soc. Belge Electr. 5, 7, 1967, 3.
- [3] R.T. Jenkins, D.S. Joy, "Wien Automatic System Planning Package (WASP) — An Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code", USAEC Report, ORNL-4945, July 1974.
- [4] IAEA, "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries — General Report", Vienna, 1973.
- [5] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Indonesia", Vienna, 1976.
- [6] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Bangladesh", Vienna, 1976.
- [7] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Pakistan", Vienna, 1976.
- [8] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Hong Kong", Vienna, 1977.
- [9] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Venezuela", Vienna, 1978.