

## Разработка Модели для Симуляции Греческого Рынка Электроэнергии

После либерализации Греческого рынка электроэнергии, Греческое Агентство по Регулированию в Энергетике (АРЭ) приступило к разработке проекта и внедрению модели симуляции оптового рынка и его взаимодействий с Системой Транспорта Природного газа. Модель состоит из нескольких взаимодействующих модулей, представляющих все ключевые рыночные операции и их динамику, включая (i) день - день перед планированием, основанный на предложениях участников рынка, (ii) ограничений, накладываемых на систему природного газа, (iii) незапланированных изменений нагрузок и доступной пропускной способности, зависящие оба от нечеткого стохастического характера результатов или преднамеренных отклонений участников от графика, (iv) действительное время распределения, и (v) финансовая ситуация на день вперед и действительные разницы в реальном масштабе времени между запланированными и фактически выполненными операциями. Модули объединены в один пакет программ, способный моделировать всю рыночную динамику, определенную или вероятностную и их взаимодействий в разрезе разных желаемых масштабов времени. Намеченное использование Модели – это помощь АРЭ в уточнение и изучение воздействия принимаемых стратегических решений на эффективность функционирования рынка. Окончательная цель Модели состоит в том, чтобы оценить эффективность существующих или предлагаемых Правил Рынка в обеспечении стимулов для конкурентоспособного функционирования и воспрепятствования рыночных манипуляций. Данная статья описывает приспособление модели для ее применения к существующему рынку электроэнергии в Греции и является основным ключом для его пересмотра.

**Костис Сакеларис, Андреас Влакхос,  
Костис Перракис  
Микхаел К. Караманис, Сидарт Деб**

Агентство по регулированию в Энергетики  
(Греция), Афинский Университет  
Экономики и Бизнеса  
Бостонский Университет, Бостон, Массачусетс,  
Агентство по регулированию в Энергетики

### 1. Введение

Либерализация рынка электроэнергии в Греции началась с утверждения Закона 2773/1999, согласующий национальное законодательство с Директивой 96/92/ЕС. Закон установил новые юридические лица в электрическом сектора Греции, включая Агентство по Регулированию в Энергетике (АРЭ) и Греческий Оператор Системы Передачи (ГОСП), а так же, устанавливает основные направления создания конкурентоспособного рынка электроэнергии. Первоначальный проект рынка, описанный в Кодексе Операции Функционирования рынка, принятый в 2001, не оправдал надежды при привлечении на рынок новых участников, поскольку доля коммунальных услуг на рынке (Public Power Corporation - PPC) в 2005 все еще занимала 97 % в снабжении и 99 % в розничной продаже.

Последующий Закон об электричестве (номер 3175/2003) и новый Кодекс Операции Функционирования рынка (2005) предусматривает новые правила развитие централизованного ежедневного оптового рынка для сгенерированной и потребленной электроэнергии в Греции. Кодекс был постепенно введен в действие в период с октября 2005 до середины 2009.

Для оценки нового варианта рынка электроэнергии, а так же для развития и исследования потенциальных путей, по которым может развиваться рынок, АРЭ объявила открытый международный тендер, по оказанию консультативных услуг на

“Разработку модели симулирования систем Электроэнергии и Природного газа Греции, включая Планирование, Выполнение и Становление в короткие сроки Оптовых Рынков”. Статья описывает совместное усилие АРЭ-ЛКГ по проектированию и развитию Модели, охватывающей правила, вложенные в греческий Проект оптового Рынка электроэнергии. Раздел 2 описывает фундаментальные понятия греческого оптового рынка электроэнергии., Раздел 3 представляет краткий обзор Модели, Раздел 4 представляет детали каждого основного

деление показано в таб.1.

Поскольку структура рынка заинтересован в этом, национальной объединенной электроэнергетической компании, ОЭК, принадлежит приблизительно 95.3% установленной мощности "различных" единиц (на лигните, природном газе, нефти и на гидроресурсах). Два конкурента держат оставшиеся 4.7 % с двумя тепловыми агрегатами на газе (с газовыми турбинами комбинированного цикла - 390 МВт и с открытым циклом - на 150 МВт). Если учесть возобновляемые источни-

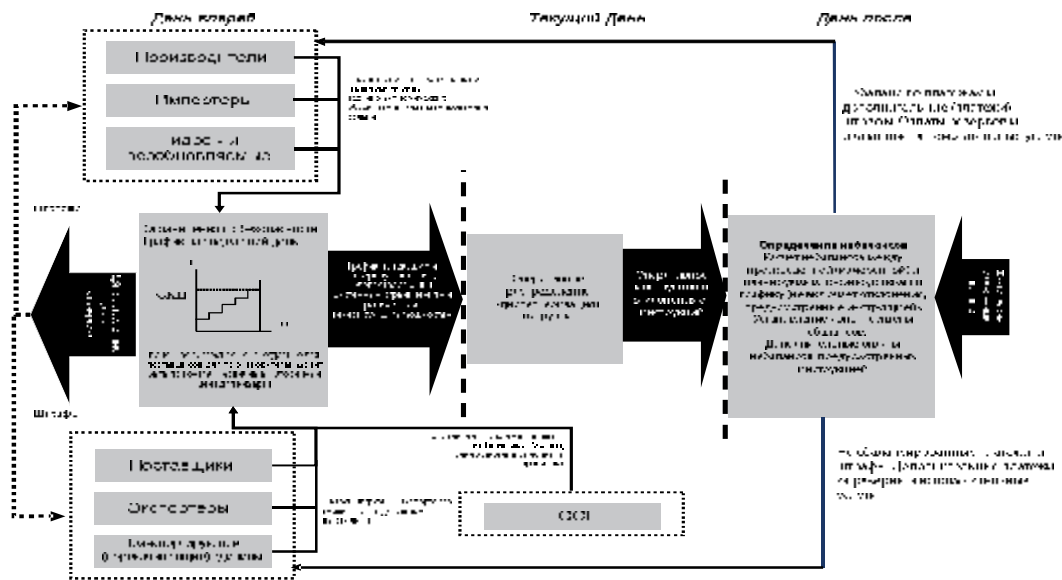


Рис 1. Схема Проекта Оптового Рынка Электрической энергии Греции

модуля, В 5 Разделе рассматриваются ключевые технические проблемы относительно интеграции модуля и разработки программного обеспечения, и Раздел 6 представляет следующие шаги по расширению модели и ее применение.

## 2. Оптовый Электроэнергетический Рынок Греции

Генерация в объединенной энергетической системе Греции базируется главным образом на парогенераторных блоках, работающих на лигните, а также и на значительном гидро-потенциале, который покрывает приблизительно 10 % от общего спроса. На 31.12.2007 суммарная максимальная чистая (нетто) выработка электроэнергии в объединенной энергосистеме составляла 11871 МВт. Ее распре-

Тип электростанции	Располагаема мощность (МВт)
Агрегаты на лигните	4808.1
газовые турбины с комбинированы циклом (натуральный газ)	1962.1
Агрегаты на нефти	718
Гидро -агрегаты	3016.5
Другие агрегаты на природном газе	486.8
Возобновляемые энергетические источники и микро-когенерация	769.7
Другая когенерация	109.7

Таб.1. Установленная мощность в Греции

ки энергии, ВИЭ, (ветровые, фотоэлектрический, микро-гидроэлектростанции, на биомассе, и т.д) и небольшие электростанции с ко-генерацией, не принадлежащие ОЭК, тогда доля установленных мощностей на рынке, принадлежащих ОЭК, падает приблизительно до 90%.

Первоначальный проект рынка основан на централизованном распределении, с двумя основными ограничениями: со стороны производителей, которые требовали покрытие конечных стоимостей их продукции и поставщиков, которые стремились иметь достаточную генерируемую мощность, эквивалентную потребностям их потребителей. В 2005 эти два ограничения были смягчены, и была принята единая модель объединения. Таким образом, оптовый рынок электроэнергии Греции, согласно Закону №3426/2005 и новый Кодекс Операции Функционирования рынка 2005, состоит из:

(а) Рынок на День Вперед (ДВп), где осуществляется планирование и уточнение общего объема энергии, произведенной и потребляемой в Греции, а также импорта и экспорта ('принудительное' объединение).

б) Диспетчеризация нагрузки в реальном времени

в) Определение небалансов, которые включают определение отклонений объемов энергии от заданных по графику на день вперед и услуг, необходимых для баланса энергосистемы.

г) Механизм Полной Гарантии, через который покрывается часть фиксированных стоимостей производственной мощности.

Все сделки сделаны через рынок (объединение) - «День вперед», в котором не входят двусторонние сделки с физической поставкой и соответствующими контрактами между производителями, поставщиками и клиентами. Однако, двусторонние финансовые контракты могут быть свободно заключены вне Объединения.

2.1 Рынок. «День Вперед» (ДВп). Рынок ДВп составляет первую стадию процесса оптового рынка и включает следующие отдельные рынки, которые оптимизированы:

- Рынок Энергии
- Рынок Резервной энергии
- Механизм рынка для размещения производства около центров потребления

На основе текущего дня, ежедневно, участники Энергетического Рынка выставляют свои предложения (цена и объемы) на покупаемой генерируе-

мой энергии (спрос), в виде функции увеличения (уменьшения) цен из 10- ступеней (Евро/МВт час) и объемы (МВт час) для каждого 24 часов следующего дня. Производители также представляют предложения относительно Рынка Резервов в виде единой цены (ЕВРО/МВт), зависящей от количества (МВт) для каждой резервной категории (Первичный и Вторичный резерв).

Предложения принимаются до 12.00 после полудня, после чего ГОСП решает проблему ДВп, на основе предложений и запросов цен участников.

Более точно, проблема формулируется как Принудительное Обязательное Обеспечение Безопасности социального благосостояния в течение 24 часов следующего дня, путем одновременного обеспечения равенства между спросом (согласно Декларацией Нагрузки) и выданной в сеть энергией (согласно Предложениям Производителей, отдельно для каждой генерирующей единицы), которая сталкивается с рядом ограничений. Основные ограничения: ограничения передающей системы, технические ограничения генерирующих агрегатов и ограничения спроса на резерв. Решение ДВп определяет, какой агрегат (единица генерирующей мощности) будет функционировать для каждого периода распределения нагрузки (а именно, для каждого часа) дня распределения нагрузки, и также клиринговые цены Рынков Энергии и Резерва. Объединение в задаче Двп потребностей резервов и ограничений передающей системы, которые могут ограничивать количество энергии, которое передается с Севера на Юг, минимизирует график отклонения Двп от оперативной работы агрегатов, и поэтому уменьшает количество сделок Урегулирования Дисбалансов.

Получающаяся почасовая клиринговая цена Двп рыночной энергии (Системная Конечная Цена - СКЦ) является однородной ценой, по которой Представители Нагрузки покупают энергию, в ожидании, что их потребители скомпенсируют часть ее из Системы, и эта часть в то же самое время, является ценой, заплаченной Источникам. В большинстве случаев СКЦ включает единую цену для всех Производителей, независимо от их географического положения. Однако, если введены Ограничения по Системе Передачи, это приводит к установлению двух различных Конечных Цен: для генерации и соответственно для Северную и Южную Систему. Дифференцирование Конечной

Цены для Производителей отражает зональную стоимость электроэнергии и обеспечивает необходимые экономические предпосылки для производителей размещать свои генерирующие агрегаты в местах, где их цена для Системы выше, чтобы устранить существующие ограничения. Все процедуры Двп, включая финансовое урегулирование ,заканчивающихся сделками на энергии, заканчиваются в пределах дня, который предшествует дню физической поставки энергии, названный как " День Вперед (Двп).

2.2 Операции диспетчеризации (распределения) в режиме реального времени. В режиме реального времени, каждые 5 минут, ГОСП перераспределяет генерирующие агрегаты в соответствии с запланированным рынком на Двп, чтобы с минимальными затратами на генерацию покрыть нагрузку при обеспечении полной надежности системы. Для этой цели, проблема сформулирована как задача Линейного Программирования, целевой функцией которой является минимум затрат на генерацию с ограничениями по выдаваемой мощности, продиктованные нагрузкой (соответствует прогнозируемой для следующего 5 минутного интервала), техническими ограничениями генерирующих агрегатов, ограничениями по сетям и требованиями по резерву.

2.3 Определение Небалансов. Различия между (i) объемам производства и потребления, также как и резервы, намеченные рынком на Двп и (ii) соответствующие объемы, измеренные согласно фактическому режиму функционирования Системы, определены в течении выявления небалансов. Участники рынка кредитуются или в дебите в зависимости от того, имели ли они отрицательные или положительные отклонения от их графика на Двп. Кроме того, все предписанные отклонения Производителям оплачиваются по крайней мере по их конечной стоимости. Дисбалансы определены в разрезе зональных СКЦ, решая снова ту же самую проблему Двп как на день вперед, но на сей раз, используя фактическую нагрузку, выработку ВИЭ и располагаемую мощность каждого генерирующего агрегата.

### **3. Описание Модели**

Модель содержит несколько модулей, которые могут быть классифицированы как симулирующие

или вспомогательные модули, использующие одни и те же вычислительные процедуры.

Основными модулями Модели являются:

- (i) Алгоритм, который моделирует Греческий Клиринговый Рынок Электроэнергии на День вперед (Двп) (КРЭДвп). Это - алгоритм оптимизации, который определяет оптимальный график генерации, спроса и резервов рынка Двп.
- (ii) Модуль, который управляет Потокм Нагрузки (ПН) Греческой системы электропередачи. Модуль ПН используется, чтобы идентифицировать слабые места в системе передачи, которые могут наложить ограничения на пропускную способность передачи мощности между различными зонами. Модуль перерабатывает эту информацию, чтобы ввести эти ограничения в задачу КРЭДвп. Модуль обеспечивает оценки межзональных пределов передаваемых мощностей, чтобы определить ограничения по пропускной способности, необходимые как входная информация для программного модуля КРЭДвп.
- (iii) Модуль, который решает Экономичное Распределение (ЭР) нагрузки через каждые 5 минут, используя предварительную информацию из КРЭДвп. Модуль ЭР используется, чтобы смоделировать функционирование греческой энергетической системы в реальном времени. Согласно алгоритму, он выдает оптимальное экономичное распределение нагрузки через каждые пять минут, которое используется ГОСП-ом. Для того, чтобы распределение нагрузки удовлетворяло всю энергосистему, в алгоритм модуля включаются перетоки мощности. Основное различие между модулем ЭР и КРЭДвп состоит в том, что модуль ЭР не выдает график нагрузки агрегатов, то есть он не обязан выдавать решения относительно ввода в действие или отключения отдельных агрегатов. Обычно модуль выполняет предписанные операции, которые следуют из решения задачи Двп, за исключением, когда существенное событие, которое имело место, не приводит к их пересмотру. Другие функциональные возможности модуля ЕД должны охватывать изменения в входных данных, обусловленных их реальной нечеткостью. Эти изменения учитываются вспомогательным модулем, Оперативным Модулем (Модулем Изменений). Цель модуля

состоит в том, чтобы привести исходные данные варианта к реальному времени, автоматически генерируя по определенному закону возможные отклонения между исходными данными введенные для «День Вперед» и фактическими, ожидаемыми на этот день

(iv) Модуль, который сравнивает КРЭДВп ежедневный график с соответствующими результатами, выданные ЭР, и Определяет Финансовые Различия (ОФР) согласно рыночным правилам. ФУ модуль используется, чтобы выполнить необходимые вычисления отклонений энергии, выявленные во время Определения Небалансов. Это - модуль урегулирования (поселения) симулирующей системы, и его главная задача состоит в том, чтобы точно вычислить кредит и штрафы, поскольку они появляются в Сетке и Рыночном Кодексе Действия.

(v) Модуль, который разрабатывает соответствующую модель Греческой Системы Транспортирования Природного газа (ГСТПГ), чтобы оценить эксплуатационные расходы ГСТПГ и определять, если запланированный график снабжения поставяет ГСТПГ необходимые объемы природного газа в необходимое время и необходимого давления для покрытия диктуемые графиком генерации электрической энергии КРЭДВп, а так же оставшееся предсказанное или не предсказанное потребление газа, обусловленное скорректированной генерацией в результате раз-

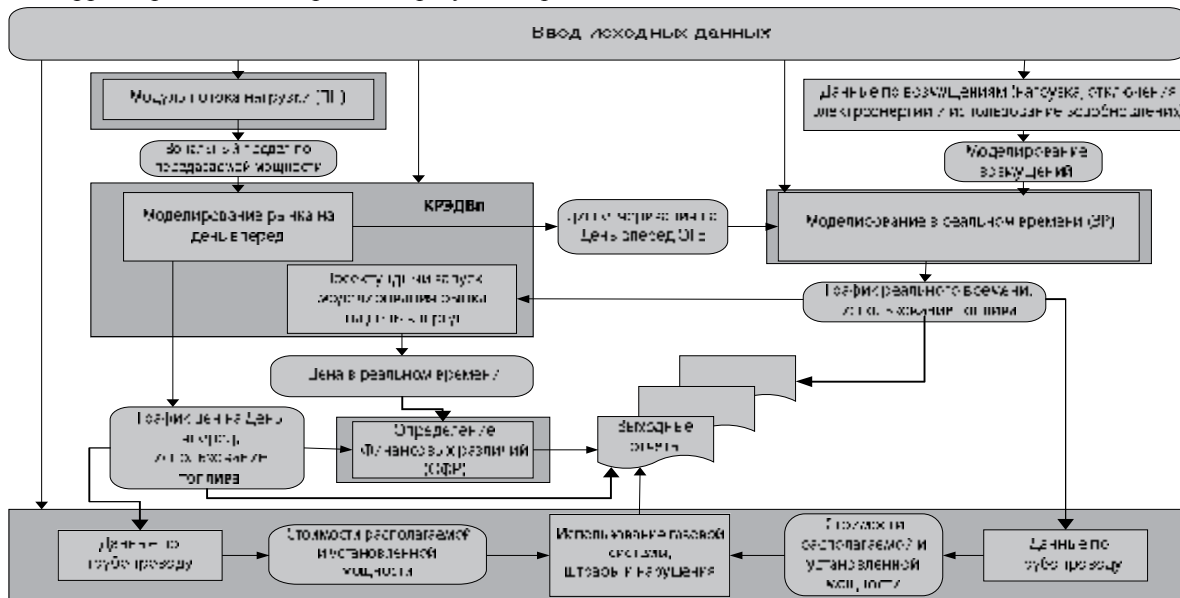
ницы между КРЭДВп и ЭР, вызванные дополнительными, относительно небольшими запросами природного газа из топливных резервов.

Основой для разработанных вышеуказанных модулей является общая методология и методы функционирования и оптимизации энергетических систем, за исключением некоторых особенных методов ЛКГ, входящих в данные модули. Также для приближения модели к реальным условиям были добавлены и объединены в систему ЛКГ некоторые специальные модели и дополнительные функциональные возможности моделирования.

Преимущественно, общие методологии и методы, связанные с операцией систем власти и оптимизацией, были фоном для них, кроют сделанные модули, за исключением небольшого количества составляющих собственность методов LCG. Далее, некоторое специальное моделирование и моделирование функциональных возможностей были добавлены и объединены в системе LCG, в смысле обеспечения даже большего количества реализма к моделируемым действиям.

Особенности ЛКГ следующие:

- *Логика спроса очередности приоритета:* Эта логика используется, чтобы гарантировать, что очередности предлагаемого спроса будет сохранена, даже в случае раскола рынка. Предложения спроса будут рассмотрены в конкурентоспособном



порядке, независимо от зоны, в которой они были предложены. Эта логика была необходима, так как предложения нагрузки рассматриваются по однородной усредненной цене, в то время как предложения производства энергии рассмотрены по их соответствующим зональным ценам.

- *Логика не предписанных отклонений*: Логика не предписанных отклонений имеет своей цели выловить эффекты, когда генераторы не следуют за инструкциями и распоряжениями, выданные ГОСП в режиме реального времени. Это в случаи, когда ГОСП предпринимает действия по разгрузке и экономическому перераспределению нагрузки, опираясь на опыт и логику диспетчера (оператора), а не на некоторой заранее предписанной процедуре или руководстве действий. Таким образом, цель логики состоит в том, чтобы приблизить моделирование необходимых оперативных действий как можно ближе к «реальной жизни», в случае не предписанных отклонений.

- *Логика Возвращения к началу*: специальная логика, управляемая в пределах выполнения ЭР, которое используется, чтобы смоделировать решения, принятые в режиме реального времени относительно чередования обязательства генерирующей единицы и графика генерации, когда условия системы и готовность источников очень далеки от предсказанных на день - вперед.

Кроме того вспомогательные модули были расширены, главным образом для того, чтобы сгенерировать и управлять обменом данными между модулями. Один из этих вспомогательных модулей - оперативный модуль.

## **4. Подробное о Описание Модели**

### **4.1. Модуль Рынка на День Вперед**

КРЭДВп модуль используется, чтобы моделировать алгоритм оптимизации рынка на ДВп, по которому определяется оптимальный суточный график нагрузки на следующий день, обеспечивающий максимальное социальное благосостояние каждый час и в течении 24 часов следующей сутки одновременно.

Фактически Модуль решает классическую задачу определения ежечасную оптимальную нагрузку каждого агрегата, используя Смешанный Метод Целочисленного Программирования (МЦП), который наилучшим образом предписывает время пу-

ска /остановки генерирующих единиц. При решении этой задачи, модуль учитывает как физические характеристики агрегатов, так и некоторые требования и решения по рынку, если они есть.

Модуль учитывает в пределах оптимизации зональные ограничения, и поэтому может гарантировать, что полученные решения соблюдают любые ограничения по передаче, которые существуют между различными регионами.

Задача Модуля оптимизации КРЭДВп может быть сформулирована как задача минимизации стоимостей системных цен, включая:

- стоимость выданной и потребленной электроэнергии;
- стоимость первичного, вторичного и третичного резерва
- Стоимость единицы генерирующей мощности, участвующей в обязательном покрытии графика нагрузки, де-обязательства;
- Стоимость единицы генерирующей мощности, участвующей в обязательном покрытии договорного резерва, дополнительной энергии и единицы холодного резерва;

При выполнении этой оптимизации КРЭДВп учитывает:

- Энергетический баланс: Энергетический баланс для каждой зоны, Системную цену, оцененное ограничение спроса;
- A/S Требования: Первичных, Вторичных и Третичных Ограничений;
- Ограничения по генерирующим единицам: Верхняя предельная мощность силового блока, Максимальная располагаемая мощность, минимальная мощность по Техническим условиям, границы совместной доли основной и резервной энергии, Первичный, Вторичный, и Третичный вращающийся резерв, скачки вверх / вниз, минимальное время работы / простоя.
- Зона / зональный поток энергии: Ограничения в узле межсистемной связи по Импортируемой и Экспортируемой энергии, предельный передаваемый поток по ветвям, зональный и AS системные ограничения.
- Начальные условия (начальные, когда время 0): Текущее состояние генерирующих единиц, (включены или отключены), время нахождения в этом состоянии (часы включенного или отключенного состояния) и в случае включенного состояния - их загрузка.

Кроме того, в модуль КРЭДВп Модели была добавлена возможность вводить общие ограничения, чтобы позволить пользователям выявить ограничения, оказывающие воздействие на энергию или на вклад вспомогательного обслуживания некоторых единиц или группы единиц.

Введение этой возможности было сделано в гибкой форме, позволяющей суммирование долевого участия в производство энергии любого числа единиц и/или суммирование долевого участия в создании первичного, вторичного и третичного резерва любого числа единиц, включение факторов для каждого из вышеупомянутых вкладов единицы и определение пользователем оператора ограничения и величины ограничения "справа".

В модели также были представлены вспомогательные переменные для всех ограничений, которые могли потенциально придать проблеме неопределенный характер: Дефицит Энергии, Излишек (активное сальдо) Энергии, Первичный, Вторичный и Третичный (Вращающийся и Невращающийся) Дефицит Резерва. Каждая вспомогательная переменная в целевой функции вводится в виде штрафа, чья величина вводится пользователем, придавая желательный приоритет некоторым вспомогательным ограничениям, когда модель носит неопределенный характер.

Был добавлен механизм общей тревоги, позволяющий информировать о предупреждениях при возникновении определенных условий. В настоящее время, предупреждения активизированы, если возникает любое из следующих четырех условий:

- Вспомогательная Используемая Переменная, для случаев, когда есть опасность, что она может привести к тому, что задача будет нерешаемой;
- Ситуация Прерывания Решения задачи, для случаев, когда некоторые предложения рассматриваются как определенные заранее в кодексе сети, а именно: два (или более предложения) являются экономически равными, но не все они принимаются во внимание (что значит, в общем, что они являются предельными).
- Приоритет Предложения Требования, для случаев, которые требуют предложения, очищен в заказе, который не придерживается строго принципов, которыми управляет кодекс сетки.

Модуль КРЭДВп может также использоваться для суточного обязательства, когда имеются неожидан-

ные события или большие отклонения между прогнозируемой и фактической нагрузкой или генерацией за возобновляемых источников. Отдельный механизм 'возвращения' добавлен в модель для контроля моделируемого действия ЭР в реальном масштабе времени и определения, является ли или нет дополнительное обязательство генерируемой единицы необходимым в любом узле в течение всего дня. В настоящее время Греческий Оператор Системы Передачи имеет эти параллельные возможности.

## **4.2. Модуль Потока Нагрузки**

Модуль Потока Нагрузки (ПН) обеспечивает оценки межзональных пределов передачи мощности. Они используются для ввода в модуль КРЭДВп.

Модуль основан на коммерчески доступный пакет программ названный UPLAN, предлагаемый Консалтинговой группы ЛКГ Этот пакет решает задачу установившегося режима сети через поток мощности. Определяется поток энергии интерактивным решением ряда нелинейных уравнений, которые дают амплитуду напряжения и фазовые углы в узлах и потоки активной и реактивной мощностей через каждую линию электропередачи.

В качестве входных данных, LF требует данные по сети, в том числе по каждой ЛЭП, трансформатора и их характеристики, такие как активные и реактивные сопротивления, проводимости и пределы термической устойчивости. Кроме того, он требует данные о генерации и потребления на каждом узле. Потребление каждого узла задается распределением нагрузки и заданной в составе вводных данных КРЭДВп. Первоначально генерирование может быть введено вручную или может быть задана в результатам запуска КРЭДВп.

В том случае, если вводятся ограничения при передаче потока мощности или нет выполнимых решений, обеспечивающие баланс между генерацией и потреблением совместно с потерями, рассчитанными по потокам мощностей, может потребоваться перераспределение нагрузки и использование алгоритма манипуляции генерацией и потреблением. Может потребоваться целый ряд итераций по перераспределению пока ПН найдет оптимального решения.

Наконец, так как метод потока мощности определяет только фактические потоки по линиям электропередачи, соединяющие любые две зоны, LF

требует, чтобы были выполнены стандартные методы определения максимальной пропускной способности электропередачи. В частности, желательно, чтобы фактическая передаваемая мощность была равна максимальной пропускной способности электропередачи. Пользователи таким образом смогут предусмотреть вариант функционирования энергосистемы в чрезвычайных условиях, включая большую зональную нагрузку или энергосистемы, и вероятные непредвиденные обстоятельства.

### **4.3. Модуль Изменчивости**

В течение функционирования в реальном масштабе времени, уровни нагрузки и располагаемой генерирующей мощности могут отличаться от предложенных на рынке ДВп и отраженных в графике ДВп.. Следовательно, модуль необходим, чтобы моделировать незапланированные изменения, связанные с функционированием рынка электроэнергии, возмущая вход КРЭДВп и, подготовить входа модуля ЭР. Точная цель модуля Изменчивости, который находится между DAEMC и модуль ЭР - ответственность за создание возможных отклонений между входами этих двух модулей.

Более определенно, модуль изменчивости используется как инструмент, чтобы воспроизвести "реальные" события, после предопределенных или настроенных вероятных распределений генерации и нагрузки, варианты стратегического поведения участника и т.п.

Он также, определяет изменения готовности генерирующей единицы по сравнению с состоянием готовности используемого в решении КРЭДВп или по сравнению с заданных на выходе уровней, установленных для выбранных генераторов в противоположность тому, чтобы следует из выхода программы или оперативной диспетчерской команды и отклонений нагрузки или генерации за счет возобновляемых источников. Они могут быть классифицированы как а) случайные и непредвиденные события (то есть изменения нагрузки, изменения генерации за счет возобновляемых источников и отключения генератора), учтенные методом моделирования Монте Карло, или б) преднамеренными, вызванными действиями со стороны участника рынка (например, не выполнение распоряжение диспетчера), учтенные в входных данных пользователя. Ясно, что такие возможности должны быть

предусмотрены, для их учета в модуле ОФР (например, не следует из диспетчерского указания), определенный пользовательским входом. Чистое ослабление соответствующей категории имеет существенное значение так, чтобы это могло быть принято во внимание в модуле ОФР.

Учет случайных событий позволяет пользователям вводить для стохастических параметров вместо их фиксированных значений, их закон вероятностного распределения. Модуль изменчивости из КРЭДВп по заданным законам вероятностного распределения сам будет выбирать необходимые значения.

Соответствующие законы распределения были выбраны пользователем среди обычно используемых законов распределения вероятности в энергетике: Нормальные, Логарифмические Нормальные, Бета и Гамма, Треугольные распределения. Эти распределения были выбраны так, чтобы соответствовать наблюдаемым статистическим данным и с учетом необходимой корреляции между различными вариантами Монте Карло.

Во время разработки модуля пришлось решать две известные задачи. Сначала, нужно было решать задачу несоответствия в выборе времени и статистических свойствах данных КРЭДВп и ЭР. Частота нагрузки и производство энергии за счет возобновляемых источников являются почасовыми величинами. КРЭДВп возьмет эти данные и будет использовать их непосредственно. ЭР, однако, требует разбивку ввода данных через каждые пятиминутные интервалы, включая наибольшую частоту их изменения в реальном масштабе времени, названное "вьющимися" характеристиками ряда 5-ти минутного ввода. Подход к их описанию состоял в том, чтобы на неизменные почасовые данные наложить наиболее подходящий выбранный закон распределения их вероятностей. Чтобы достичь корреляции между почасовыми и 5-минутными данными, использовалась линейная или кубическая интерполяция. Пользователь может ввести более реальные 5-минутные входные данные для ЭР, используя возможность учета к интерполированным данным случайной ошибки.

Вторая проблема имеет отношение к Многоинтервальной Оптимизации, выполняемой ЭР.

Эта особенность требует, чтобы решение задачи в текущий интервал осуществлялось одновременно с ее решением для следующего интервала. Если бы для прогнозов нагрузки и генерации от воз-



обновляемых источников был произведен только один набор данных, то это подразумевало бы, что ЭР обладает “прекрасным прогнозированием” на следующие (будущие) интервалы в разрезе моделируемого много-интервального горизонта. Чтобы избежать этого, были сгенерированы отдельные входные кривые, чтобы представить “прогнозируемые” и “фактические” данные, входящие в процессе ЭР; “фактические” данные используются для первоначального интервала, в то время как “прогнозируемые” данные используются для следующих интервалов в моделируемом много-интервальном горизонте.

#### **4.4. Модуль Экономического Распределения**

Модуль Экономического Распределения (ЭР) перераспределяет уже заданную генерирующим агрегатом генерацию в каждом 5–ти минутном интервале, корректируя ежечасно энергетические графики на день вперед, полученные от КРЭДВп, учитывая соответствующие технические ограничения (ограничения по генерирующему оборудованию, ограничения по сети, и т.д.), получая более подробный прогноз покрытия нагрузки в каждом 5 минутном интервале.. Таким образом, ЭР основано на:

- предписанный КРЭДВп графике генерации каждой генерирующей единицы
- выставленные предложения участников рынка
- прогноз нагрузки и генерации от возобновляемых источников (для каждого из пятиминутных интервалов)
- технические характеристики передающей энергосистемы и генерирующих единиц
- события в 'реальном времени' (моделируемые), такие как полные и частичные отключения и т.д.

Прогноза нагрузки в течение каждых 5-ти минут моделирует фактическую нагрузку, которая отклоняется от почасового прогноза нагрузки используемого в КРЭДВп, чтобы моделировать ошибки прогноза груза (см. выше Модуль Изменчивости). Прогнозируемая или фактическая нагрузка в каждом пяти минутном интервале распределена по передающей сети, используя соответствующие факторы распределения.

ЭР использует полную модель Потока Мощности,

введя соответствующие сетевые ограничения при выработке диспетчерского решения между зонами и вне зон эксплуатации.

Общая цель ЭР состоит в том, чтобы найти оптимальное распределение (уже заданное) генерирующих единиц для покрытия нагрузки для минимизации стоимости снабжения электроэнергией и вспомогательных услуг (обеспечивающее максимальное благосостояние) при соблюдении системных ограничений, то есть Мин (Стоимость генерации + Стоимость резерва - Доход Нагрузки), где: Стоимость Генерации представляет все энергетические предложения, включая импорт, для всей системы во всех периодах времени;

- *Доход Нагрузки* представляет доход от оцененной нагрузки (предложения) и включает все декларации для всей системы (включая экспорт) на все периоды времени.
- *Стоимость резерва* представляет первичные и вторичные предложения резерва для всей системы на все периоды времени.

Рассматриваются следующие ограничения:

- Баланс Энергии для каждого узла (шины)
- Требования A/S
  - o Ограничение по Первичному Резерву
  - o Вторичный Резерв.
- Ограничения по генерирующим единицам:
  - o Предложения по верхней цене связанных в единый технологический процесс блоков
  - o Максимальная располагаемая мощность и техническая минимальная мощность
  - o Комбинированная генерация электроэнергии и резервный вклад
  - o Первичная и Вторичная Резервные Способности
  - o Нормативные пики подъема и спуска
  - o AGC норма пиков.
- Ограничения по Безопасности Сети
  - o предел передаваемого по ветви потока мощности
- Начальные Условия
  - o Текущая располагаемая мощность генерирующей единицы (МВт)
  - o времена возрастания или снижения генерации(часы).

Модуль ЭР «Много-интервальный», то есть оборудован способностью предварительно определить количество 5-ти минутных интервалов (обычно

13), входящих в прогнозируемый период времени. Чтобы решить эту проблему, задача ЛП сформулирована, с учетом предписанных генерирующих единиц из модуля КРЭДВп вместе с предложениями по электроэнергии и A/S и другой информации, такой как нагрузка в течение каждых 5-минут и генерация электроэнергии возобновляемыми источниками, отключения генератора и линий электропередачи, начальные условия и изменения пределов генерации генерируемых единиц, для решения модулем DC задачи оптимального потока электроэнергии с учетом A/S требований одновременно для всех 5-ти минутных интервалов. Ожидается, что ЭР будет оперировать, используя тринадцать (или более) 5-ти минутных интервалов, чтобы обеспечить прогнозирование изменения генерации больше чем на один час вперед, чтобы таким образом учесть сползание генерирующей мощности генераторов вверх / вниз в пределах этого часа.

Следуя решению ЛП, поток мощности ПТ определен для каждого 5-минутного периода, чтобы гарантировать, что решение DC является действительно жизнеспособным и что не нарушаются необходимые уровни напряжения.

Кроме того, всякий раз, когда существенный случай имеет место (например, когда имеет место отключение на ТЭС или отключение ЛЭП), КРЭДВп модуль призван возвращаться к начальным условиям, предшествующим моменту возникновения данного случая.

#### **4.5. Модуль Определения Финансовых Различий.**

Модуль ОФР используется, чтобы выполнить необходимые вычисления относительных отклонений объемов электроэнергии от установленных правил, описанных в Сетевом Рыночном Кодексе, которые имеют место в электроэнергетической системе.

Это обеспечивает финансовый кредит и штрафные суммы, вытекающие из этих отклонений. Результаты модуля представлены в удобочитаемом виде, дающие полный обзор о финансовых урегулированиях.

Модуль был построен как автономная программа, начинающая работать после получения результатов из КРЭДВп и ЭР, используемых как его входные данные.

Чтобы обеспечить адекватную гибкость в структуре модуля для его приспособления к изменению в будущем установленных правил, был введен интерфейс кодирования предписанных вычислений. Пользователям предоставлена возможность изменять вычисления в соответствии с предписаниями каждой отдельной статьи правил, используя язык программирования Visual Basic.

#### **4.6. Модуль Системы Передачи Природного газа**

Чтобы смоделировать совместное функционирование Греческой Системы Транспортирования Природного газа (СТПГ) и Греческого рынка электроэнергии, потребовался специальный модуль, моделирующий функционирование обеих систем и обеспечивающий необходимыми рекомендациями АРЭ. Особенно касающейся способности СТПГ обеспечить ожидаемое функционирование электростанций на природном газе на длительный и короткий сроки, на основе выходных результатов КРЭДВп и ЭР с учетом потребностей остальной части потребителей природного газа в Греции. В то же самое время, если в этом есть необходимость, модуль СТПГ может быть использован и самостоятельно, вне Модели.

Вырабатываемое решение основано на коммерчески доступном пакете (Решений задачи электроэнергетики), называемом PipeLine Studio®. Система была апробирована во многих регионах мира и поэтому учитывает все особенности и функциональные возможности этих регионов и может быть использована повсеместно.

Поскольку данный пакет программ моделирует только часть задач СТПГ, для ЛКГ необходимо было разработать интерфейс связи между модели по электроэнергии и модели по газу, обеспечивая одновременно необходимые объемы газа для генерации необходимых объемов электроэнергии согласно оптимального графика, который выводится на экране после окончания решения задачи.

В случае несоответствия (сигнал тревоги), возможна ручная координация между располагаемыми возможностями и целями Модели Греческого Рынка. При координации вручную, Пользователь должен руководствоваться списком тревожных ситуации, выработанным модулем СТПГ, выявляя генерирующие единицы, для которых поставка

газа не соответствует генерации, налагая на них ограничения по выработке электроэнергии или предельной мощности, чтобы привести в соответствие поставку газа и выработку электроэнергии для этих единиц, повторяя решение задачи до получения приемлемого решения.

## **5. Интеграция Модулей и развитие Программного обеспечения**

Все модули, кроме механизма моделирования СТПГ, были первоначально запрограммированы и объединены под одним общим интерфейсом пользователя. Основным используемым языком программирования - Net ®.

Модуль СТПГ использует внешнее, коммерчески доступное программное обеспечение PipeLine Studio®.

Модули КРЭДВп и ЭР используют основной механизм оптимизации CPLEX ®. Математическая модель построена и может быть изменена в пределах модуля, используя процедуру вызова подпрограмм из библиотек CPLEX, до их приведения к общему внешнему входу CPLEX наряду с некоторыми опциями управления, определенными пользователем. Модуль ПН использует в качестве ядра коммерчески доступное программное обеспечение UPLAN. Модуль ЭР был по существу написан «с нуля», но содержит некоторые процедуры, взятые от системы UPLAN.

Модули Изменчивости и ОФР были уникально созданы только для данной модели.

### *Пользовательский интерфейс*

Графический Интерфейс Пользователя (ГИП) Модели имеет большое количество окон и позиций табуляции, которые обеспечивают быстрый и легкий доступ к входным данным, конфигурации и определяемым параметрам, а также к результатам. ГИП и включает традиционный мощный поиск и методы фильтрации, облегчающие рассмотрение и редактирование соответствующих входных данных. Зависимые данные могут быть представлены также и графически, используя встроенной способности их графического представления.

Все эти типичные особенности, приобретенные в торговой сети в виде программы для обработки исходных данных, успешно интегрированы в данном симуляторе рынка, обеспечивающий гибкий,

дружественный, и очень эффективный пользовательский интерфейс. Хотя нет никакой поддержки формальной автоматической проверки системы исходных данных, графический интерфейс пользователя после любых изменений, запрашивает пользователя о сохранении или нет исходного типа класса данных как набор файлов XML, учитывая ручную проверку версии исходных данных. Пользователь может перезагрузить исходный набор данных для продолжения моделирования или использовать их как исходные для нового моделирования.

Результаты до СТПГ, составляющие третью часть результатов, эффективно интегрируются в остальной части симулятора греческого рынка. Пользователь изолирован от подробностей в моделировании сети газопровода и выполнении СТПГ. Возможные тревожные ситуации, касающиеся надежности газоснабжения генерирующих единиц на газе и необходимого запаса топлива для поддержания оптимального графика генерации, представляются по окончании расчетов на экране.

### *Архитектура*

Архитектура программы такова, что позволяет обеспечивать максимальную универсальность выбора конфигурации и среды моделирования, где пользователь может редактировать и изменять любые входные данные и параметры и создать любой сценарий моделирования. Однако, набор данных должен быть реальным, а ограничения и ресурс оперативных характеристик должны быть непротиворечивыми, чтобы обеспечить рациональные и реалистические решения.

Введение универсальных ограничений в КРЭДВп и правила редактирования в модуле ОФР, являются двумя основными сильными опциями определения конфигурации.

### *Модель данных*

Чтобы соответствовать современным практическим программам, Симулятор был создан на уровне последних достижений в моделировании исходных данных. Введенные реляционные модели гарантируют последовательность между данными, представленными в различных модулях системы, и допускают их эффективный контроль. Как правило, относительные модели данных связаны с данными, постоянно находящимися в реляционных базах данных.

Однако, для гибкости, масштабирования и единого принципа их представления, которые уменьши-

ли бы шанс противоречивостей входных данных, реляционная модель использовалась для данных файла, где они хранятся, в пределах их применения и стандарта XML.

Каждая входная таблица со всеми ее полями отображена на экране. В случае, если между таблицами есть взаимосвязи, каждая взаимосвязь между полями в одной таблице и в другой показана со своими ключевыми значками. Каждый специальный ключ поля от одной таблицы используется как идентификатор связи с соответствующим полем в другой таблице. В модели представлена каждая часть данных, используемых в симуляторе, за исключением данных предназначенных для ввода в модуль СТПГ.

#### *Межмодульные зависимости*

Для того, чтобы модуль КРЭДВп работал должным образом, ему требуется большое количество данных, поступающих из информации по рынку или вводимые пользователем. Его функционирование зависит только от модуля ПН. В частности, модуль ПН может быть использован для выработки зональных ограничения по передаче мощности, которые в конечном счете могут послужить входными данными для КРЭДВп.

Также, что бы выполнить свои функции, модулю ЭР требуется график нагрузки. Модуль КРЭДВп выдает график нагрузки, который включает: Почасовой график Нагрузки и Генерации (для генерирующих единиц, которые были выбраны для покрытия ступеней графика нагрузки в реальном времени, определенных из условий рынка на День Вперед) и выявленных Предложений спроса (чтобы ввести правильный уровень спроса нагрузки в своих вычислениях, модулю ЭР необходима информация, какие предложения спроса будут определяться в процессе).

Для того, чтобы успешно функционировал модуль ЭР, он должен иметь достаточно гибкий ввод данных, позволяющий при необходимости любую степень их детализации, то есть с разбивкой на пятиминутные интервалы (в отличии от почасовых интервалов КРЭДВп). Они являются теми же данными, которые будут использованы в модели определения различий между известными данными по системе, запланированными на День Вперед и реальными данными распределения нагрузки. Таким образом, они являются данными, которые могут использоваться, чтобы имитировать возмож-

ные неопределенности, которые могут возникнуть при функционировании системы. Они могут быть получены из комбинации данных вводимых пользователем и данных, созданных Модулем Изменчивости.

Данные составляющие эту неопределенности состоят из пятиминутных возобновляемых “фактических кривых” и “кривых системы технической возможности”, пятиминутных Запросов “фактических кривых”, “системы технической возможности”, и частичного и полного вывода из работы генераторов.

Модуль ПН - это единственный модуль, у которого технически нет никаких зависимостей. Он разделяет много данных и общую логику с другими модулями, но не обменивается с ними информацией. Однако, ввод дополнительных мощностей, требуемые для решения задачи потока мощности (распределения нагрузки), будут взяты из результатов КРЭДВп (это производится автоматически).

Основные функциональные обязанности модуля ОФР- взять результаты других модулей и выполнить соответствующие вычисления. Это следует процедурам урегулирования, выполняемые ГОСП после заключения операций фактического рынка.

Принципиальный модуль, на который полагается ОФР, является КРЭДВп. Фактически, ОФР полагается дважды на механизм оптимизации КРЭДВп: один раз, когда КРЭДВп вырабатывает решения для рынка первоначального Дня Вперед и второй раз, когда решает задачу снова для последующий период времени, основываясь уже на имеющееся реальную информацию, выполняя вычисления с учетом уже имеющимися пост-фактум ценами. Смысл заключается в том, что цены в реальном времени должны быть разработаны, используя тот же самый механизм, который использовался для Дня Вперед. Что касается первого раза, при включения в работу КРЭДВп, ОФР получает системные и маргинальные зональные почасовые цены и почасовую генерацию и спрос, график нагрузки на каждый час (принятые предложения спроса). От модуля ЭР, модуль ОФР требует почасовые измеренные значения генерируемой мощности и предписанные графиком значения генерируемой мощности. На их основе, используя механизм КРЭДВп, ОФР выдает окончательные системные и маргинальные зональные почасовые цены в условиях реального времени функционирования системы.

Кроме характеристики греческой газовой сети, для свои вычисления, СТПГ необходимы данные от КРЭДВп и от ЭР. Смысл ввода информации от обеих модулей заключается в том, что симулятор только так сможет предсказать различия в использовании газовой сети, основанные на различных условиях функционирования на День Вперед и в Реальное время.

В частности, СТПГ получит от ЭР измеренные почасовые значения генерации, которые он преобразует в необходимое потребление топлива. Аналогично, он получит от КРЭДВп почасовой график генерации, который также будет преобразован в значения топливного потребления.

## **6. Следующие Шаги**

Главная цель Модели состоит в том, чтобы развивать и анализировать потенциальные пути, которыми может развиваться функционирование рынка. Более определенно, в течение периодов, через которые проходит Рынок к постепенному принятию и внедрение нового Кодекса инструкций функционирования Сети и Рынка. Важная задача состоит в моделирование рыночной результативности до и после переходного периода, чтобы определить его результативность, которая будет в действительности после окончания переходного периода. Вышеупомянутые моделирования предназначены, чтобы помочь АРЭ узнать при помощи моделирования в виртуальной действительности ожидаемые потенциальные проблемы в результативности функционирования рынка в будущем. Кроме того, когда Рыночные инструкции Кодекса будут полностью внедрены, Модель будет использоваться, чтобы контролировать реальное поведение участников

рынка.

В данной статье обсуждается стадия внедрения Модели, описываются различные модули из которых она состоит и подробности их объединения в единую модель.

Следующий шаг должен продолжить фактическое использование Модели для:

-Оценить случаи и стратегии, используемые участниками для рыночной манипуляции и Монополистические/олигополистические игры (операции) с электроэнергией на ближайшую перспективу, а так же вспомогательные рынки услуг в их развитии.

- Оценить эффективность текущих рыночных правил, а также рассмотреть эффективность их пересмотра.

Для этих действий, может понадобится создание специальных моделей и методологии, чтобы способствовать мониторингу рынков, например, модель предложения цены, основанной на игре, которая может основываться или нет на классических подходах подобно Cournot, Stackelberg и т.д. Проект такой игры не обязательно должен быть ограничен днем вперед или учитывать реальные рыночные условия, что позволяет достигнуть более высокую эффективность, имея более широкие возможности, включая тарифное регулирование, заключение бизнес-контрактов, конкурентоспособные соображения по конкурентоспособности импорта / экспорта. Идеальный подход был бы в том случае, если следовать развитию математической модели, способной к предсказанию вероятных стратегий в отношении цен, предложенных рыночными игроками, которые соответствуют местным рыночным правилам и различным объективным условиям и могут быть преобладающими.

### **Замечание**

В проектировании и развитии Модели, приспособленной к задачам АРЭ, ЛКГ были использованы собственные модели, кодексы, алгоритмы и другая конфиденциальная деловая информация, входящая в общую модель.

### **Литература**

Annual Report to the EC, RAE, 2005

Call for Tenders: "Development of Greek Electric Power and Natural Gas Systems Simulator Including Planning, Execution and Settlement of Short-Term Wholesale Markets", RAE, May 2006, [www.rae.gr](http://www.rae.gr)

Grid and Market Operation Code (2005), [www.rae.gr](http://www.rae.gr)

LCG Consulting, [www.energyonline.com](http://www.energyonline.com)

JC Passelergue, P.Simon, I. Blanas, M.Philippou, D. Michos, G. Christoforidis, "Market-based real-time dispatch in the Hellenic Power System", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.1 996 – 1001,2004