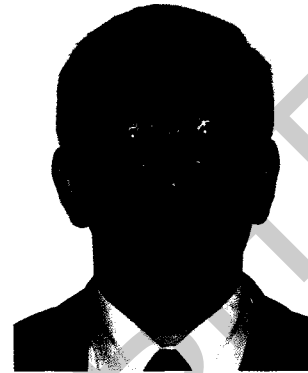


ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ТОКОВЕДУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ГИБКИМИ ПРОВОДНИКАМИ

В статье проведен анализ актуальности расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками в условиях Республики Беларусь. Обозначены недостатки существующих способов расчета и предложен авторский метод, реализованный в компьютерных программах. Рассмотрены примеры применения предлагаемых программных продуктов на реальных объектах. Предложены подходы к разработке способов повышения электродинамической стойкости токоведущих конструкций.



И.И. СЕРГЕЙ,
д.т.н., профессор БНТУ

Annotation

The article analyzes the relevance of calculating the electrodynamic stability of current-carrying structures with flexible conductors in the Republic of Belarus. Deficiencies of existing calculation methods are indicated and the author's method implemented in computer programs is proposed. The review of possible areas of application of the offered software products, including on an example of real objects of a power system is carried out. Approaches to the development of methods for increasing the electrodynamic stability of current-carrying structures are proposed.

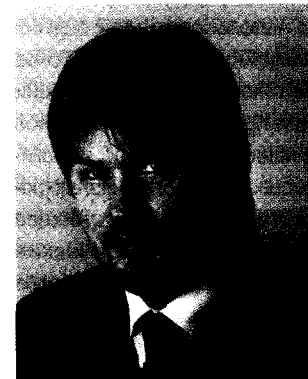
Статья поступила в редакцию 15 июня 2017 года

В ПУЭ 6-го издания [1] в качестве границы «безопасной» зоны электродинамического действия тока короткого замыкания (КЗ) на гибкие проводники указана величина в 20 кА, и лишь при больших токах КЗ предусмотрено производить проверку на электродинамическую стойкость. Из более поздних редакций ПУЭ указание на предельный ток КЗ исчезло. В настоящее время расчеты электродинамического действия токов КЗ регламентируются ГОСТ 30323-95 [2], в котором не обозначена величина тока КЗ, при превышении которой необходимо производить расчеты электродинамической стойкости для гибких проводников.

Наибольший расчетный ток трехфазного КЗ в Белорусской энергосистеме в настоящее время наблюдается на стороне 110 кВ Минской

ТЭЦ-3, и по данным РУП «Белэнергосетьпроект» его значение может достигать 50 кА. С вводом новых мощностей следует ожидать дальнейшего роста уровней токов КЗ в Белорусской энергосистеме, особенно после ввода в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции, поэтому вопросы расчета электродинамической стойкости сохраняют свою актуальность.

В вышеупомянутом стандарте [2] указано, что расчет гибких проводников на электродинамическое действие токов КЗ следует вести с помощью компьютерных программ. Методика расчета, приведенная в стандарте, является рекомендуемой, поскольку для провода в качестве расчетной принята схема с жестким стержнем, ось которого очерчена по цепной линии. Такой подход не позволяет учесть тепловое



Е.Г. ПОНОМАРЕНКО,
к.т.н., доцент, ученый секретарь филиала БНТУ «Научно-исследовательская часть»

и упругое удлинение провода, изменение его формы во время движения при КЗ, которая будет отличаться от цепной линии. Очень упрощенно в рекомендованной методике [2] учтены конструктивные элементы пролета с гибкими токопроводами: гирлянды изоляторов, отпайки, шлейфы, опорные конструкции. Все это вносит существенную погрешность в результаты расчетов.

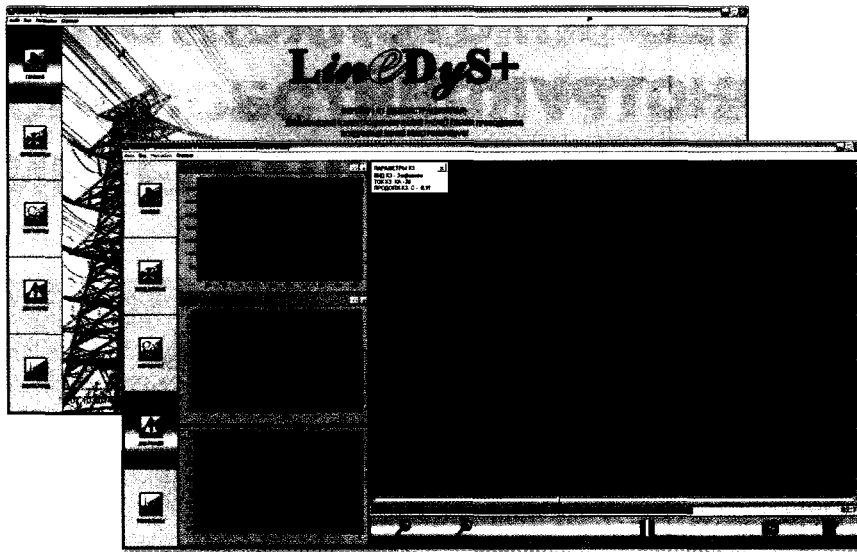


Рис. 1. Диалоговые окна компьютерной программы LinEDyS+

Компьютерные программы для расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками

Согласно стандарту [2] авторы статьи предлагают использовать для оценки электродинамического действия токов КЗ на гибкие токоведущие конструкции компьютерные программы собственной разработки, являющиеся плодом многолетних исследований в области электродинамической стойкости. В настоящее время на кафедре «Электрические станции» БНТУ в активной разработке находятся два программных продукта: FleBus [3], предназначенный для расчета электродинамического действия токов КЗ на гибкие шины распределительных устройств, и LinEDyS+ – для расчета воздушных линий электропередачи [4] (рис. 1).

Алгоритм расчета в представленных программах построен на уравнениях гибкой упругой нити [5], которые являются дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных. Численный метод решения указанных уравнений применительно к гибким токоведущим конструкциям разработан и подробно представлен в публикациях авторов [3, 5]. В программах учитываются основные конструктивные элементы пролетов с гибкими токоведущими частями (порталы или опоры, гирлянды изоляторов, электрические аппараты и отпайки к ним), а также различные параметры короткого замыкания и климатические условия, предшеству-

ющие и сопутствующие КЗ: ветер, температура окружающей среды и гололед.

При разработке программ учитывалось, что под действием тока КЗ провода приходят в сложное колебательное движение с большой амплитудой, сопровождающееся повышением тяжения. Благодаря представлению провода в виде гибкой нити по результатам компьютерного расчета можно получить координаты каждой точки провода в процессе колебаний, определить значения тяжения и температуры, а также другие параметры.

Оценка достоверности результатов расчета с использованием компьютерной программы

Алгоритм расчета, использованный в программах, был апробирован с применением экспериментальных данных [6], полученных Бельгийской лабораторией LABORELEC при испытаниях в тестовом пролете (рис. 2). Исследователи подавали ток силой 28–30 кА

на провода в пролете и, используя скоростную камеру и тензодатчики, определяли траектории движения в средней точке провода в плоскости, перпендикулярной пролету, и величину тяжения проводников. Результаты экспериментов LABORELEC рекомендованы Международным советом по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) для сравнительной оценки программных средств [6].

Ниже представлены отдельные результаты сопоставления данных – экспериментальных [6] и полученных с использованием компьютерной программы FleBus (рис. 3 и 4). Из анализа приведенных рисунков видно, что достигается достаточно точное совпадение результатов расчета и опытных измерений.

Погрешность расчета максимальных отклонений и тяжений проводников в большинстве случаев не превышает 10 % [3] и обусловлена допущениями, принятыми для моделей провода в виде гибкой упругой нити и опорных конструкций, которые в программе представлены упрощенно в виде сосредоточенных масс траверсы и стоек, закрепленных на пружинах. В реальности опорные конструкции состоят из множества металлических элементов различного профиля, скрепленных между собой сваркой и болтовыми соединениями, ослабление которых может произойти в процессе эксплуатации. Невозможность точного учета характеристик опорных конструкций, по опыту авторов, приводит к наибольшим погрешностям в электродинамических расчетах.

Условия и параметры электродинамической стойкости

В результате движения проводников под воздействием электродинамических усилий может произойти их недопустимое сближение с проводниками

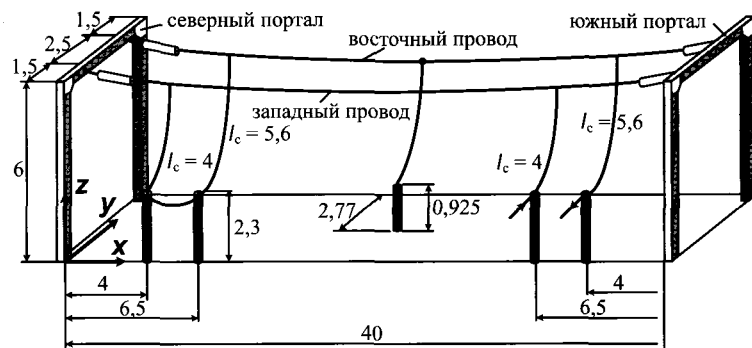


Рис. 2. Геометрия тестового пролета LABORELEC [6]

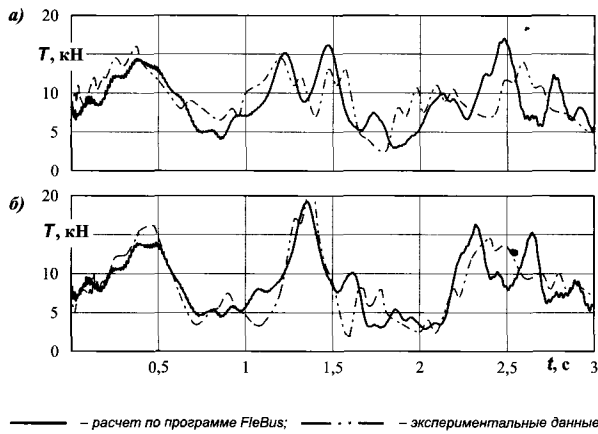


Рис. 3. Динамика тяжений в точке крепления проводов к северному portalу: а – восточный провод; б – западный провод

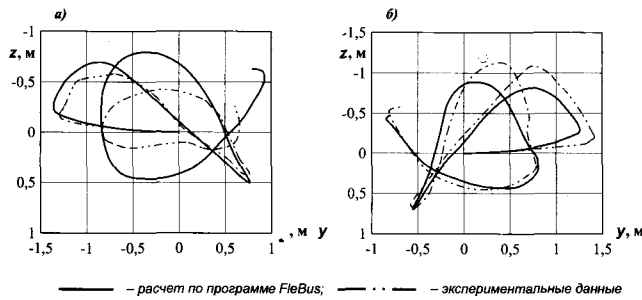


Рис. 4. Траектории движения проводов в средней точке пролета: а – восточный провод; б – западный провод

соседних фаз или с заземленными конструкциями с нарушением электрической прочности воздушного промежутка. Например, КЗ может произойти на линии электропередачи (ЛЭП), что наиболее вероятно, а недопустимое сближение проводников будет наблюдаться в распределительном устройстве (РУ), шины которого остаются под напряжением. Это может привести к повторному КЗ уже на шинах РУ.

Как видно из рисунка 3, в процессе колебаний проводов многократно возрастают их тяжения по отношению к статическому режиму. Они передаются на опорные и изоляционные конструкции и при недостаточной механической прочности могут их повредить.

С учетом сказанного выше оценка электродинамической стойкости гибких проводов согласно ГОСТ [2] должна производиться по двум условиям:

$$s_{\max} \leq s_{\text{доп}}, \tag{1}$$

$$T_{\max} \leq N_{\text{доп}}, \tag{2}$$

где s_{\max} , T_{\max} , $s_{\text{доп}}$, $N_{\text{доп}}$ – соответственно максимальные расчетные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

Допустимые отклонения проводов $s_{\text{доп}}$ определяются из тех соображений, чтобы минимальные расстояния между проводниками фаз $A_{\text{ф-ф, min}}$, а также между проводниками и заземленными частями $A_{\text{ф-з, min}}$ не превысили допустимых изоляционных расстояний, определяемых при рабочих напряжениях

$$A_{\text{ф-ф, min}} \geq A_{\text{ф-ф, доп}}; A_{\text{ф-з, min}} \geq A_{\text{ф-з, доп}} \tag{3}$$

где $A_{\text{ф-ф, доп}}$ и $A_{\text{ф-з, доп}}$ – минимальные допустимые расстояния соответственно между проводниками фаз и проводниками и заземленными частями при рабочем напряжении, м.

По условию (2) проверяют на механическую прочность провода, гирлянды изоляторов и другие конструктивные элементы пролета. Наиболее слабыми по механической прочности элементами являются опорные конструкции и аппараты РУ.

Максимальные расчетные отклонения проводов s_{\max} могут быть определены с помощью компьютерной программы на основе данных о траектории их движения при КЗ (как на рис. 4, например); также и максимальные тяжения T_{\max} определяются исходя из информации о динамике тяжений (как на рис. 3). При этом пользователю компьютерных программ FleBus и LinEDyS+ не придется анализировать диаграммы тяжений или траектории движения проводников, так как в программу заложен алгоритм определения максимальных тяжений и допустимости минимального расстояния между проводниками, что значительно облегчает обработку результатов расчета.

При электродинамическом расчете токоведущих конструкций РУ кроме сборных шин должны также учитываться отпайки к электрическим аппаратам и опорным изоляторам (спуски). Отпайки, как утяжеляющие и ограничивающие движение элементы, оказывают существенное влияние на результаты электродинамического расчета и зачастую препятствуют сближению сборных шин соседних фаз, тем самым повышая электродинамическую стойкость пролета. Однако длина отпайк достаточно велика, поэтому следует предусмотреть возможность сближения отпайк соседних фаз между собой и со сборными шинами. Через отпайки на аппараты РУ передаются механические усилия, которые могут оказаться критическими по условиям механической прочности аппаратов.

Расчет динамики отпайк при КЗ имеет некоторые особенности [7]. Отпайка имеет то же сечение, что и основной провод, но при этом значительно меньшую длину. При таких условиях она уже не является абсолютно гибкой нитью и на ее движение существенное влияние оказывает изгибная жесткость провода, которую необходимо учитывать при расчетах, поскольку игнорирование этого показателя приводит к значительному искажению результатов. Для приближенного учета изгибной жесткости провода в уравнения его движения введена сила, появляющаяся при изгибе спуска и препятствующая ему [7]. Точный учет жесткости провода затруднителен, так как связан с решением дифференциальных уравнений с производными четвертого порядка, при численном решении которых значительно возрастают погрешности, вызывая сбои в компьютерной программе.

Указанные улучшения алгоритма компьютерной программы позволили повысить точность и в большинстве случаев исключить сбои численных расчетов, а также существенно расширить перечень решаемых практических задач.

Примеры применения компьютерных программ при расчетах электродинамической стойкости

С использованием разработанных авторами компьютерных программ был проведен ряд практических исследований в сотрудничестве с проектными организациями Республики Беларусь и Российской Федерации.

Совместно с РУП «Белнипиэнергопром» производилась разработка технических мероприятий по повышению элек-

тродинамической стойкости гибкого токопровода 10 кВ в схеме электроснабжения ОАО «Могилевхимволокно» [8]. По данным службы энергетика предприятия, там наблюдалось недопустимое сближение фаз токопровода при токе КЗ 13 кА продолжительностью 1,2 с.

С использованием компьютерной программы BUSEF (предшественницы FleBus) были разработаны рекомендации, которые предусматривали:

- установку двух междуфазных распорок в 1/3 и 2/3 частях пролета, что позволяет не только исключить недопустимое сближение фаз токопровода, но и снизить тяжения;

- уменьшение шага расщепления токопровода с 0,4 м до 0,12 м с использованием типовой распорки для напряжения 110 кВ, что позволяет увеличить междуфазные расстояния;

- использование междуфазной распорки на основе стеклопластикового стержня и полимерного покрытия, которая имеет значительно меньший вес, чем существующая распорка для токопроводов с использованием стеклянных подвесных изоляторов.

Совместно с ИООО «Зарубежэнергопроект-Минск» выполнялся расчет пролетов проводов воздушных ЛЭП 220 кВ одной из электростанций в Российской Федерации с учетом климатических и электродинамических воздействий [9]. На электростанции предусматривалось расширение существующего открытого распределительного устройства (ОРУ) 220 кВ. Из-за нехватки площади расширение выполнялось в виде комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) 220 кВ. Проектируемые пролеты ЛЭП предназначались для присоединения новых блоков к КРУЭ и для связи ОРУ 220 кВ и КРУЭ.

Особенностью пролетов является их достаточно большая длина (около 100 м), а также закрепление фазных проводников на разных высотах: с одной стороны провода крепятся в горизонтальной плоскости к стене главного корпуса, с другой – к анкерной двухцепной опоре с расположением фаз по треугольнику. Подобное конструктивное решение делает практически невозможным применение упрощенного метода расчета электродинамической стойкости, рекомендованного стандартом [2].

Для достижения электродинамической стойкости рассматриваемых

пролетов также было предложено использование междуфазных изолирующих распорок, место расположения и длина которых из-за сложной геометрии пролетов подбиралась в каждом случае индивидуально. С учетом того, что пролеты ЛЭП должны были располагаться над поверхностью водохранилища и, соответственно, риск гололедных отложений существенно возрастал, по результатам проверки механической прочности было рекомендовано усиление опорных конструкций во избежание их разрушения.

Белорусский программный продукт использовался также для оценки электродинамической стойкости воздушных ЛЭП крупной электросетевой компании Российской Федерации. Для проведения исследований программы были существенно доработаны, что расширило сферу их возможностей и позволило учитывать все особенности ЛЭП.

В результате доработанное приложение было выделено как отдельный программный продукт под названием LinEDYS+. С его использованием была выполнена оценка электродинамической стойкости проводов воздушных линий в нескольких пролетах и установлены условия нарушения их электродинамической стойкости, определена возможность превышения тяжения над допустимой величиной по условиям механической прочности, а также получено выражение для определения допустимой длины пролета, соответствующей току электродинамической стойкости ЛЭП.

В рамках научных исследований с использованием разработанных компьютерных программ авторами были также решены такие задачи, как определение расчетного вида, расчетной продолжительности КЗ и расчетных климатических условий, проведено изучение влияния на электродинамическое взаимодействие гибких проводников неуспешного автоматического повторного включения (АПВ), срабатывания устройств резервирования отказа выключателя (УРОВ) и других процессов, протекающих в энергосистеме.

Также была частично решена задача определения токов электродинамической стойкости для гибких токоведущих конструкций. Как известно, параметры электродинамической стойкости различных видов электрооборудования устанавливаются заводами-изготовителями, причем в отношении провод-

ников – только для комплектных и закрытых токопроводов.

Следует иметь в виду, что для жестких и гибких шин ток электродинамической стойкости зависит не только от физико-механических параметров, но и от геометрических характеристик пролета РУ и способа установки отдельных фаз относительно друг друга. Поэтому токи их электродинамической стойкости могут быть определены лишь индивидуально для каждого объекта на стадии проектирования или реконструкции. Чтобы облегчить задачу проектировщикам, по условию (1) были рассчитаны токи электродинамической стойкости пролетов типовых ОРУ напряжением 110–330 кВ [7]. На напряжении 110 кВ, например, расчетные токи электродинамической стойкости для отдельных пролетов оказались ниже 20 кА. Учитывая существующие в Белорусской энергосистеме уровни токов КЗ и возможность их повышения, расчеты электродинамической стойкости видятся актуальными не только для вновь проектируемых, но и для уже действующих электроустановок с гибкими проводниками. Особую актуальность в этом случае приобретает разработка способов повышения электродинамической стойкости уже эксплуатирующихся РУ и ЛЭП.

Способы повышения электродинамической стойкости

Наиболее действенным способом повышения электродинамической стойкости РУ и ЛЭП, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междуфазных распорок. Их можно применять как для вновь сооружаемых, так и для существующих объектов. Задачей проектировщика при этом является выбор необходимого количества распорок и оптимальных мест их установки.

В существующих РУ типовой конструкции для ограничения сближения сборных шин и спусков соседней фазы в шинных пролетах можно рекомендовать, например, установку дополнительных опорных изоляторов. При этом необходимо определить место установки и количество дополнительных элементов.

При проектировании новых РУ для повышения электродинамической стойкости кроме указанных выше способов можно применять увеличенное междуфазное расстояние и V-образные

гирлянды изоляторов, выбирать оптимальную по условиям электродинамической стойкости схему расстановки электрических аппаратов в РУ, частично выполнять ошиновку жесткими проводниками.

Во всех указанных случаях для выбора и обоснования оптимального проектного решения можно рекомендовать использование компьютерных программ FleBus и LinEDyS+.

Выводы

Разработанный метод расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками, реализованный в компьютерных программах, позволяет решать научные и инженерные задачи при проектировании распределительных устройств, линий электропередачи и других токоведущих конструкций, стойких к электродинамическому действию токов короткого замыкания. С использованием предлагаемых компьютерных программ можно разрабатывать способы повышения электродинамической стойкости существующих

токоведущих конструкций. Применение компьютерных программ отвечает требованиям стандарта по расчету электродинамической стойкости гибких токоведущих конструкций.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323-95. – Введ. 01.03.1999. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 1999. – 57 с.
3. Пономаренко, Е.Г. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств с применением неявной схемы / Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 5. – С. 34–45.
4. Разработка компьютерной программы расчета и проведение оценки электродинамической стойкости воздушных линии ОАО «МОЭСК» при росте уровней токов КЗ: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ, рук. И.И. Сергей. – Минск, 2013. – 73 с.
5. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
6. The mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (rigid or flexible bus-bars). – Paris, 1996. – 90 p. – (Preprint / CIGRE; Brochure № 105. Working Group 23–11, SC 23).
7. Пономаренко, Е.Г. Методы расчета и анализ электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Е.Г. Пономаренко. – Минск, 2010. – 151 с.
8. Сергей, И.И. Учет электродинамического действия токов короткого замыкания при проектировании гибких токопроводов 6–10 кВ систем электроснабжения / И.И. Сергей [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 5. – С. 21–28.
9. Сергей, И.И. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И.И. Сергей [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 1. – С. 38–44.

МИРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

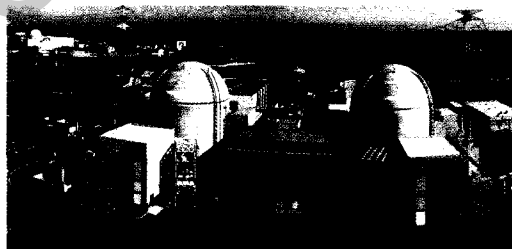
Отказ Южной Кореи от атомной энергетики может привести к снижению уровня жизни в стране

Антиядерные настроения до недавнего времени не были характерны для Южной Кореи. Скорее наоборот: в стране было распространено мнение, что развитие атомной энергетики сыграло важную роль в «корейском экономическом чуде» в последние полвека. Так что атомная энергетика оказалась в центре общественной дискуссии в Сеуле несколько неожиданно. Возможно, на южнокорейские настроения повлияли заявления «зеленого лобби» в западных странах. Некоторую роль сыграла и авария на японской АЭС в Фукусиме.

В июне президент Южной Кореи Мун Чжэ Ин официально заявил, что Южная Корея прекращает строительство новых атомных энергоблоков и отказывается продлевать срок эксплуатации существующих.

Между тем, как известно, Южная Корея практически лишена полезных ископаемых. В стране есть небольшое количество низкокачественного угля, но вся нефть и весь газ ввозятся из-за

рубежа. А поскольку с геополитической точки зрения Корея является островом, то ни о каких закупках электричества из-за границы речи идти не может. В свое время Южная Корея жестоко страдала от нехватки электроэнергии, и только начавшееся в конце 1970-х развитие ядерной энергетики смогло коренным образом переломить ситуацию.



В настоящий момент 30 % всей южнокорейской энергии производится на АЭС. По мировым меркам это достаточно большая доля. В России и США, например, доля атомных электростанций в общем производстве электроэнергии составляет 17 и 20 % соответственно. С другой стороны,

во Франции на АЭС производится 70 % всей электроэнергии. По доле АЭС в общем производстве электроэнергии Корея сейчас близка к таким странам, как Финляндия или Швейцария.

Опыт других стран, которые пошли по пути свертывания атомной энергетики, показывает: это ведет к неизбежному увеличению цены электроэнергии. Например, за период 2011–2015 годов в Японии и Германии, которые сейчас наиболее активно свертывают атомную энергетику, тарифы на электричество выросли на 20–30 %. Нет никаких оснований думать, что в Южной Корее подобного не случится.

Впрочем, отказ от АЭС означает не только существенное увеличение конечной цены электроэнергии. Дешевое электричество снижает себестоимость многих южнокорейских товаров. Если в результате отказа от АЭС цены вырастут на 20–30 %, то многие виды продукции станут неконкурентоспособными, а предприятия, их производящие, закроются.