



УДК 621. 436. 004.5 (035)

© Г. Б. Горелик, 2011

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ВЫБОРУ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЗАМЕНЕ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДИЗЕЛЬНЫМИ

Горелик Г. Б. – д-р техн. наук, проф. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», тел. 22-58-09, e-mail: Ggorelik@mail.ru (ТОГУ)

Аварии атомных электростанций имеют серьезные последствия для окружающей среды. Поэтому человечество вынуждено искать им альтернативную замену. Выходом из сложившейся ситуации является применение дизельных электростанций с двухтактными дизелями группами до 8–10 дизель-генераторов особо большой мощности на одной станции, расположенных вблизи городов.

Accidents at atomic power stations have serious consequences for the environment. Therefore the mankind has to search for an alternative replacement. The solution to the situation is the utilization of diesel power stations with duple diesel engine in groups of up to 8 - 10 ones with extremely high-power diesel engines - generators at one station, located near to cities.

Ключевые слова: дизель, дизель-генератор, система автоматического регулирования, топливная аппаратура дизелей, нестабильность частоты вращения, крутильная система, перетекания электрической мощности.

Общие положения

В настоящее время становится очевидным, что атомные электростанции в силу ряда обстоятельств на ближайшие десятилетия не имеют перспектив дальнейшего развития и применения. В первую очередь это определяется вопросами безопасности и экологии, во вторую – экономической целесообразностью. К примеру, Германия после очередной катастрофы на АЭС Фукусима приняла решение о закрытии действующих АЭС и о прекращении дальнейшего их строительства. До решения всех проблем атомной энергетики на первый план по возможности замещения АЭС и широко используемых тепловых электростанций, безусловно, выходят дизельные электростанции (ДЭС) особо большой мощности [1, 2].

При этом перед дизелестроительной отраслью возникают нетрадиционные задачи. Дело в том, что замещение стандартного блока АЭС мощностью



порядка 800 МВт возможно группой дизель-генераторов (ДГ) особо большой мощности (не менее 20–30 МВт в одном агрегате) в количестве до 8–10 на одной ДЭС. С целью устранения парникового эффекта и использования существующей сетевой и теплофикационной инфраструктуры сами ДЭС должны быть размещены, например, в четырех-пяти ангарах по периферии города. Для характерного среднего по населению города при этом решаются все проблемы по электроснабжению и теплофикации с высоким коэффициентом использования топлива, в том числе возобновляемого и альтернативного.

На первый план выходят, безусловно, задачи обеспечения качественной параллельной работы и комплексной автоматизации ДГ вплоть до обеспечения «безлюдной технологии». При этом становится возможным оптимальное обеспечение так называемого «жизненного цикла (Cals-технологии)» сложного комплекса, устраняется парниковый эффект и в максимальной степени может быть использована существующая инфраструктура городов.

Сроки создания и ввода в эксплуатацию стандартной ДЭС, состоящей из унифицированных комплектующих узлов, агрегатов и систем автоматизации, могут быть доведены до одного года. Для создания же АЭС, как это показывает мировая практика, требуется срок до 8–12 лет. При этом не допустима близость расположения крупных населенных пунктов, наличие тектонических разломов, сейсмических зон, особенно большие затруднения возникают при размещении АЭС в густо населенной части страны.

При проектировании ДЭС с ДГ особо большой мощности принципиально сохраняются все известные требования к приводным дизелям и синхронным электрогенераторам переменного трехфазного тока в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 10150-88, ГОСТ 10511-83, ГОСТ 24.602-86, ГОСТ 10032-80, ГОСТ 22246-84 и др.

Однако при этом следует внести ряд дополнительных условий и требований к этапам проектирования, определяемых необходимостью обеспечения высококачественной электроэнергией при одновременной параллельной работе значительного количества ДГ:

1. Однозначно принять в качестве приводного двигателя дизеля с двухтактным процессом.

2. Следует рассмотреть вопрос о подборе генератора к дизелю, вернее, о специальной разработке генератора, например, маховичного типа с моментом инерции, обеспечивающим не только требуемую неравномерность вращения, но и крутильную систему при работе с мощной сетью с частотой одноузловой формы колебаний большей, чем частота источника возмущения [3].

3. Выполнить опытно-конструкторские и исследовательские работы в части изучения физической природы источника возмущений режима со стороны топливной аппаратуры дизеля с субгармоническими частотами $n/240$ и $n/480$ Гц с последующим выбором мероприятий по его устранению.



Обеспечение качества работы ДЭС большой мощности

Основные положения здесь сводятся к следующему. *Безусловно, приводной двигатель для ДГ должен быть малооборотным (МОД) или среднеоборотным (СОД) с двухтактным процессом и имеющим средний или высокий наддув.* Двухтактный процесс по сравнению с четырехтактным имеет при одной и той же частоте вращения коленчатого вала спектр источников возмущающих сил с частотами от $n / 60$ Гц (процессы сгорания в цилиндре) и $n / 120$ Гц (процессы, связанные с топливоподачей). Эти частоты в два раза выше, чем в четырехтактных двигателях. Поэтому отрицательный эффект влияния на качество вырабатываемой электроэнергии от возможных резонансных колебаний крутильной системы, состоящей из параллельно работающих дизель-генераторов, при аналогичных условиях будет существенно ниже.

Наддув обеспечивает эффективность использования дизелей и высокие агрегатные мощности при более высокой утилизации «бросовой» энергии, что позволяет тем же количеством ДГ перекрыть потребности в электроэнергии и тепла при замене, например, блоков АЭС.

Зарубежные и отечественные фирмы выпускают преимущественно 4-тактные ДГ с мощностью до 8000 кВт. Поэтому необходимо проведение научно-исследовательских работ для успешного применения мощных 2-тактных дизелей в качестве приводных двигателей для генераторов. Целесообразно использование двигателей МОД (крейцкопфных) и СОД, которые имеют ресурсы до капитального ремонта более 100000 часов при высоких показателях надежности и недостижимым для других преобразователей энергии коэффициентом полезного действия.

Вполне резонно организовать в России серийное специализированное производство приводных двигателей для ДЭС с высокой степенью автоматизации, например, на базе Брянского машиностроительного завода с привлечением завода «Электросила» (г. Санкт-Петербург) в качестве изготовителя генераторов, что позволит существенно снизить стоимость продукции и обеспечить установку ДГ непосредственно «с колес» на объекты. Именно тогда ввод ДЭС в работу может быть обеспечен в течение года (сроки сдачи АЭС составляют 8–12 лет).

Основные направления опытно-конструкторских работ по созданию ДГ особо большой мощности и с высоким ресурсом:

1. *Установка генератора большой мощности маховичного типа* (опыт создания подобных электрических машин имеется на заводе «Электросила») решает вопрос о переводе многомассовой крутильной системы ДГ практически к одномассовой системе при параллельной работе на мощную сеть. Это обеспечивает снижение частоты собственных крутильных колебаний одноузловой формы параллельно работающего ДГ на сеть и устраняет источник возможных резонансных колебаний электрической мощности.

Сама методика выбора основных размеров при проектировании построенных и создаваемых дизелей и генераторов обуславливает выполнение геометрического и физического подобия, что приводит к большему возрастанию масс и моментов инерции вращающихся деталей в двухтактных дизелях по сравнению с четырехтактными. Это также положительный момент.

Как показали исследования ряда авторов [4, 5], при вводе нескольких ДГ в параллельную работу образуется крутильная система, представленная на рис. 1. Объединив вращающиеся массы ДГ в одну, получим упрощенную двухмассовую систему (см. рис. 1а). Экспериментальные исследования [2] подтверждают правомерность такого упрощения.

При параллельной работе дизель-генератора на мощную сеть возможна упрощенная схема, представленная на рис. 1б.

Решение уравнения движения для случая работы ДГ на мощную сеть с учетом жесткости для условного вала через электрический синхронизирующий момент $M_э$, который определяется по формуле Урусова [4], имеет вид:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{t_{so}}{J}},$$

где: f_c – собственная частота крутильных колебаний, Гц; t_{so} – жесткость условной электрической связи, равная среднему значению $M_э$ ($t_{so} = \frac{M_э}{2}$, при этом жесткость электрической связи зависит также и от нагрузки); J – приведенный момент инерции роторов дизеля и генератора.

Для разнотипных ДГ следует принять за основу схему, представленную на рис. 1а. Собственная частота крутильной системы определится как:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} t_{so}}.$$

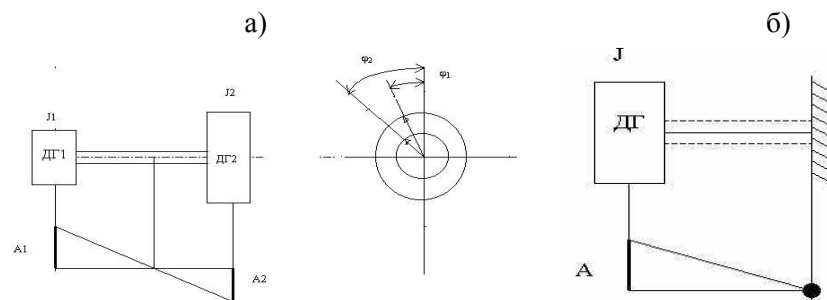


Рис. 1. Упрощенная крутильная схема при параллельной работе: а) для двух разнотипных ДГ; б) при работе ДГ на мощную сеть



Так как t_{so} зависит от нагрузки, то при изменении нагрузки f_c изменяется в определенном диапазоне. Расчет собственных частот колебаний крутильной системы дает высокую степень совпадения результатов с экспериментом, чем подтверждается адекватность принятой расчетной схемы.

Так как $t_{so}'' = 0,5 \cdot t_{so}$, то и собственная частота одноузловой формы колебаний двух однотипных ДГ практически совпадает с собственной частотой одного ДГ, работающего на мощную электрическую сеть. Это обстоятельство, например, было использовано на заводе «Дальдизель», где испытания двух ДГ были заменены работой одного ДГ на мощную сеть с рекуперацией электроэнергии. Данные соображения должны быть в основе принимаемых решений по комплектации ДЭС дизель-генераторами [5].

Следует все же считать, что выбор состава дизельной электростанции из разнотипных дизель-генераторов – возможный путь для увода системы параллельно работающих генераторов от окolorезонансных колебаний. Но для ДЭС, заменяющих АЭС, целесообразно применение однотипных ДГ.

Поскольку $f_c = F(M_s)$, а величина M_s для каждого режима конкретна, в условиях повышенных перетеканий мощности на близрезонансных режимах в связи с увеличенной амплитудой скручивания условной электрической связи существенно возрастают значения M_s и, соответственно, растет собственная частота крутильной схемы. Тем не менее, это практически не скажется на ухудшении качества параллельной работы, так как известно, что классическая топливная аппаратура на режимах более 30–40 % нагрузки начинает работать стабильно от цикла к циклу и не может вызвать резонансные колебания крутильной системы. На сегодняшний день уже доказано, что именно топливная аппаратура с характерной для нее межцикловой нестабильностью процессов с субгармонической частотой $n/240$ Гц и $n/480$ Гц является основным источником возмущения крутильной системы параллельно работающих ДГ [3].

Таким образом, при применении двухтактных дизелей существенно отличается соотношение частот вынуждающих сил и собственных колебаний системы, что и должно определить высокое качество их параллельной работы. Следовательно, применение двухтактного процесса и генератора маховичного типа решает так называемую двуединую задачу. При этом крутильная система параллельно работающих ДГ «уводится» от резонансов первого порядка, что само по себе немаловажно.

2. *Повышение качества работы ДГ* должно быть обеспечено в первую очередь применением новых систем топливоподачи аккумуляторного типа с электронным управлением. В первую очередь это обеспечивает стабильную от цикла к циклу работу топливной аппаратуры при высоких давлениях впрыскивания, что способствует с одной стороны устранению межцикловой нестабильности, с другой – повышению экономичности и экологичности дизеля при работе на долевых режимах. В последнее время в связи с выявлени-



ем нелинейности так называемых расходных характеристик топливной аппаратуры появилась новая трактовка межциклового неустойчивости процессов топливоподачи как «межциклового неравномерности впрыскиваний».

Межцикловая неравномерность аналогична неравномерности подач, но в последовательных циклах одной секции. Она может вызвать большой спектр возмущений с субгармоническими частотами ниже $n/480$ Гц, влияющими в основном на КПД цикла. Необходимо дальнейшее изучение данного явления. Следует особое внимание обратить на новые подходы к проектированию топливной аппаратуры дизелей. В частности пересмотреть гоструемый типоразмерный ряд плунжерных пар в сторону увеличения соотношения хода к диаметру плунжерной пары. Обеспечение качественной работы топливной аппаратуры на режимах малых подач вполне реально.

Таким образом, обеспечение качественной параллельной работы дизель-электрических агрегатов является реальной задачей, основной упор должен делаться на квалифицированный выбор ТА (классической или нового типа) и оптимальную комплектацию ее элементов при использовании математического моделирования с оценкой устойчивости процессов топливоподачи по предложенному критерию X и параметру K_{ϕ} [2].

3. *Становится целесообразным для стационарных двигателей внедрение в практику водотопливной эмульсии.* Опыт уже имеется, например, фирма MAN с 2004 г. выпустила партию (5 шт.) мощных дизелей с $P=14400$ кВт, оборудованных модулем для приготовления ВТЭ. Это позволяет одновременно решать все стоящие перед дизель-генераторостроением задачи (экономичность, экология, качество вырабатываемой энергии, низкие затраты и сроки на строительство).

4. *Решение вопросов полной автоматизации ДЭС* сегодня не является особой задачей, тем не менее, реально и целесообразно применение компьютерных технологий для управления (четвертая степень автоматизации) и диагностирования ДГ. Для этого необходимо проведение НИР по использованию современных средств автоматизации для ДЭС.

5. *Применение тяжелых сортов топлива* в условиях стационарной работы ДГ позволяет существенно без особых затруднений значительно снизить затраты на получение электрической энергии.

6. *Особо следует поставить задачу использования возобновляемых топлив*, например, типа «Биодизель». На автоматизированных стационарных ДГ целесообразно их применение. Расширение газовой инфраструктуры снабжения городов в том числе и на Дальнем Востоке позволяет использовать так называемые двухтопливные двигатели (газодизели) для ДЭС, что позволяет осуществлять эффективное использование газового топлива при низкой токсичности отработанных газов при существенном возрастании ресурсных показателей дизелей. При этом при необходимости работа может продолжаться только на жидком топливе.

7. *Применение высокотемпературного охлаждения (ВТО)* сокращает потребность в воде в качестве охладителя.



Безусловно, на качество параллельной работы дизель-генераторов оказывает влияние целый ряд факторов. Следует выделить следующие пути улучшения качества вырабатываемой энергии:

1. Пересмотр принятой методики подбора генератора под конкретный двигатель таким образом, чтобы снизить частоту одноузловых колебаний параллельно работающих дизель-генераторов (например, путем установки на дизели генераторов маховичного типа).

2. Установка генераторов с демпферной клеткой.

3. Установка регулятора частоты более высокого класса.

4. Оптимальная настройка системы автоматического регулирования частоты.

5. Применение регулятора напряжения электронного типа с обратной связью и корректором напряжения.

6. Оптимальная настройка системы автоматического регулирования напряжения (установка большего статизма по регулируемому параметру).

7. Оптимальная настройка параметров рабочего процесса дизеля за счет применения элементов адаптации двигателя к режиму работы.

Однако на первое место по влиянию на качество параллельной работы следует поставить процессы топливоподачи, правильная организация которых позволяет решить проблему резонансных обменных колебаний мощности при параллельной работе.

Выводы

Оценим по известной системе штрафных баллов (от 0 до 12) в табличной форме различные аспекты использования ДЭС и АЭС (таблица).

Сопоставление позиций в представленной таблице штрафных баллов показывает, что ДЭС по сравнению с АЭС на данный момент времени имеют значительные преимущества.

Круг поставленных больших, но вполне решаемых задач, невозможен без участия государства. Здесь даже целесообразно объединение усилий всего международного сообщества, так как поставленная проблема затрагивает интересы многих стран и должна решаться совместно.

Таким образом, следует считать замену АЭС дизельными электростанциями государственной задачей. Чернобыльская катастрофа и Фукусима лишней раз подтвердили, что современный мир еще не готов к безопасному использованию мирного атома. И до тех пор, пока не будет выработана надежная система получения атомной энергии, пока не будет решен вопрос о захоронении выработавших свой ресурс станций, пока не будет решен вопрос с парниковым эффектом, нельзя продолжать строительство АЭС. Строительство ДЭС вместо атомных электростанций реально, своевременно и целесообразно. Необходимо только выработать государственную стратегию подхода к решению данной задачи и перейти к проработке необходимого комплекса мероприятий и НИР в данном направлении.



Таблица

№	Показатель функционирования объекта	АЭС	ДЭС	Примечание
1	Экологическое воздействие на окружающую среду	5–6	3–4	Парниковый эффект, радионуклеиды, токсичные газы
2	Опасность в случае террористического акта	12	1–2	Мощность взрыва до 1ГВт
3	Опасность в случае технической аварии	3–12	1	Высока для АЭС
4	Производство и транспортировка топлива	9–11	1	Уран опасен при добыче и транспортировке
5	Стоимость топлива	6–9	4–5	С учетом добычи и переработки
6	Необходимость наличия собственной инфраструктуры	12	2	ДЭС расположены вблизи города
7	Капиталовложения	12	2–5	Объемы затрат на различных этапах
8	Необходимость наличия больших водоемов	12	2–4	На ДЭС ВТО уменьшает потребность воды
9	Возможность применения безлюдных технологий	10	4	Работа ДЭС под «замком»
10	Создание парникового эффекта и воздействие на климат	12	2	Рассредоточение ДЭС
11	Возможность работы на возобновляемом топливе	10	0	Реально для ДЭС

Библиографические ссылки

1. Горелик Г. Б. Перспективы и возможности замещения атомной энергетики автоматизированными дизельными электростанциями большой мощности // Сб. трудов / Рос. инж. акад. (Дальневост. отд-ние). – Владивосток, 2005. – Вып. 10.
2. Горелик Г. Б. Неустановившиеся режимы работы дизельной топливной аппаратуры: Монография. – Хабаровск. – 1995.
3. Горелик Г. Б., Жуков С. А. К вопросу о перетекании электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых режимах нагрузки при резонансных колебаниях // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы междунар. конф. «Двигатели 2002», 23–28 сент. 2002 г. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2002.
4. Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины / М.: Изд-во АН СССР, 1960.
5. Конкс Г. А. Исследование причин и методов снижения обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторов ДГР 150/750 // Дисс. – Л. – 1970.