

# Оценка надежности микротурбинных генераторов при использовании их на береговых объектах морского транспорта

С. А. ЛИЦКЕВИЧ, победитель конкурса «Молодые ученые транспортной отрасли — 2012»,  
Государственный морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова



**Оптимальным способом решения проблемы дефицита электроэнергии в регионах России является строительство объектов малой энергетики. Они быстро окупаются, могут работать в отдаленных труднодоступных районах и обеспечивать предприятию независимость энергоснабжения. Одним из наиболее эффективных и надежных средств использования малой энергетики на транспорте следует признать микротурбинный генератор.**

В России сложился такой подход к развитию энергетики, при котором в основном реализуются масштабные централизованные проекты, в первую очередь — проект создания единой энергосистемы страны, ориентированный на энергоснабжение крупных промышленных центров. Этому в немалой степени способствовало ложное представление о неисчерпаемости наших природных и водных ресурсов. Однако, по данным председателя научного совета РАН по альтернативным возобновляемым источникам энергии Олега Попеля, две трети территории страны находятся вне сетей централизованного энергоснабжения. В этих районах проживают около 20 млн чел., а тарифы на электроэнергию достигают 25 руб./кВт·ч. Переход к рыночной экономике и уход государства из ряда отраслей обнажил ряд принципиально новых проблем.

Так, в настоящее время система централизованного энергоснабжения в России переживает кризис, который имеет две составляющие: во-первых, энергетическое оборудование в значительной степени изношено из-за длительной эксплуатации и, как следствие, многие энергетические объекты требуют капитального обновления и восстановления; во-вторых, генерирующих мощностей катастрофически не хватает для развивающейся в условиях рынка транспортной отрасли. По данным,

опубликованным Министерством промышленности и энергетики, в 2012 г. выработают свой ресурс до 50 % мощности ТЭС и ГЭС, к 2020 г. этот показатель вырастет до 70 %.

Электроэнергия — основной ресурс современности. Потребление энергии в мире увеличивается в 2 раза примерно за 25 лет, электроэнергии — в среднем за 10 лет. Это означает, что все больше процессов, связанных с расходом энергоресурсов, переводится на электроэнергию [1].

За последнее десятилетие число транспортных перевозок водными и железнодорожными путями существенно увеличилось, а модернизация электрической отрасли и ввод в эксплуатацию новых мощностей существенно отстают от растущих в этих областях потребностей в электроэнергии. На морском транспорте вводятся в

строй новые береговые системы безопасности типа (ГМССБ), службы управления движением судов (СУДС), наземные радионавигационные центры, координационные центры по спасению судов при бедствиях, требующие круглосуточного потребления электроэнергии. При разветвленной речной сети в России необходимо развивать малый флот, для этого нужно строить причалы с погрузочно-разгрузочными терминалами, но для их функционирования тоже требуется электроэнергия, а в глубинке, как правило, отсутствуют финансовые и материальные средства на строительство станций и прокладку линий электропередачи.

Большинство исследователей и экспертов связывают развитие энергетической отрасли в России с малой энергетикой. Часть инфраструктуры транспорта и промышленности можно оснастить мини-электростанциями. На сегодняшний день такая децентрализация — оптимальное экономическое решение проблемы энергодефицита в морских и речных портах, на железнодорожных станциях, а также в военных комплексах, на медицинских объектах и транспортных предприятиях. Строительство объектов малой энергетики не только быст-

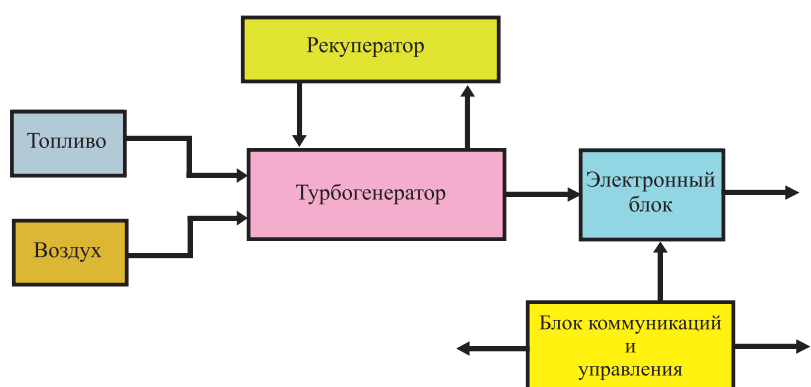
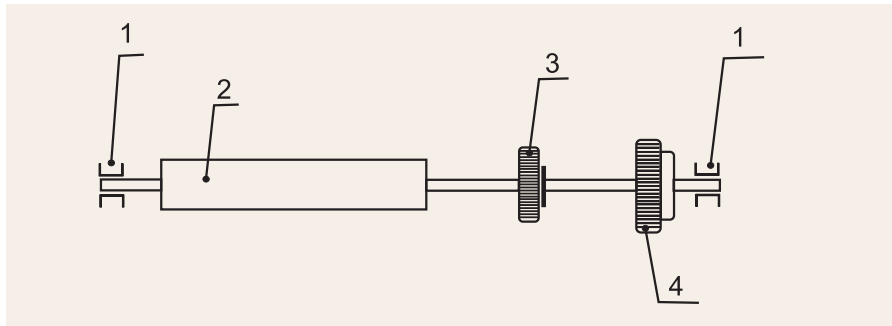


Рис. 1. Принцип работы и состав элементов микротурбинного генератора



**Рис. 2. Вращающийся вал:** 1 — воздушный подшипник; 2 — магнитный ротор; 3 — компрессорное колесо; 4 — турбинное колесо.

ро окупается, но и делает предприятие независимым от роста цен на электроэнергию и углеводородное сырье.

Рассмотрим технические преимущества малой энергетики на примере микротурбинных генераторов (МГ), которые отличаются высокой надежностью и эффективностью и обеспечивают независимость энергоснабжения (рис. 1).

Надежность МГ обуславливается следующими конструктивными особенностями:

- в конструкции МГ только одна движущаяся деталь — вращающийся вал, на котором на одной оси расположены электрический генератор, компрессор и непосредственно турбина (рис. 2);

- уникальные воздушные подшипники (рис. 3) удерживают вал ротора генератора на воздушной подушке и обеспечивают очень высокую скорость вращения вала — 96 тыс. об./мин. Эта инновация позволяет отказаться от использования масла и таким образом значительно сократить эксплуатационные затраты [2; 3];

- в установке не используются редукторы или другие механические приводы, следствием чего является высокая надежность микротурбин;

- охлаждение генератора набегающим потоком воздуха позволяет отказаться от жидкостного охлаждения, что повышает надежность и экономичность оборудования;

- в процессе работы двигателя не возникает трения и вибрации, поэтому риск поломки минимален;

- благодаря минимальному количеству регламентных запчастей, отсутствию масла и охлаждающей жидкости потребность в сервисном обслуживании возникает не чаще 1 раза за 8,7 тыс. ч, т. е. 1 раз в год [4];

- ресурс до капитального ремонта достигает 60 тыс. ч;

- стоимость капитального ремонта в среднем составляет 35–40 % стоимости микротурбинной установки (механическое устройство любого поршневого двигателя значительно сложнее, чем у

микротурбины: в нем большое количество движущихся частей, соответственно, существенно выше риск механической поломки);

- существует возможность использования не только традиционных видов топлива (природный и сжиженный газ, дизельное топливо и керосин), но и низкокалорийных и высокосернистых газов (попутный, шахтный, биогаз).

Проанализируем надежность обычного синхронного генератора и сравним ее с надежностью МГ. Для этого рассмотрим структуру МГ и сравним математическую модель надежности электромеханической части синхронного генератора, содержащего основные механические и электрические узлы (без привода), и математическую модель надежности МГ. Структурно модель надежности синхронного генератора представляется последовательной цепью соединенных электромеханических элементов, составляющих его конструкцию (рис. 4).

Математическое выражение для результирующей надежности электрогенератора имеет вид

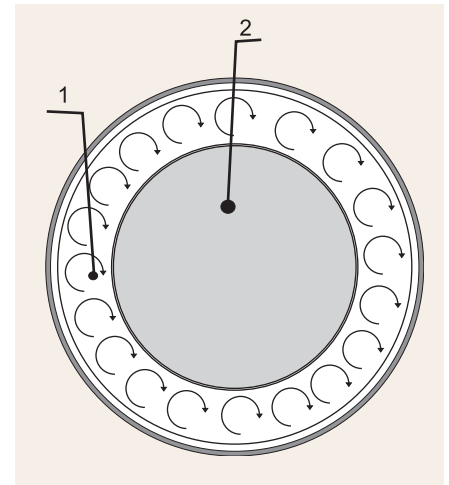
$$P_{res}(t) = P_{pod}(t) \cdot P_{ob}(t) \cdot P_{pusk} \cdot P_{zaschit}(t) \cdot P_{meh}(t) \cdot P_{kol}(t)$$

где вероятностное распределение Вейбулла безотказности подшипников по усталостному разрушению

$$P_{pod}(t) = \exp \left[ - \frac{t}{6,84 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left( \frac{C_d}{Q_d} \right)^3} \right];$$

вероятностное логарифмически нормальное распределение безотказности обмотки статора синхронного генератора

$$P_{obm}(t) = 0,5 - F \left[ \frac{\ln(t) - \mu_0}{\sigma_{\mu_0}} \right];$$



**Рис. 3. Воздушный подшипник:** 1 — воздушный слой; 2 — вал.

вероятностное нормальное (Гаусса) распределение безотказности коллекторного узла генератора

$$P_{kol}(t) = 0,5 - F \left[ \frac{t - T_{srk}}{\sigma_{srk}} \right];$$

вероятностное экспоненциальное распределение безотказности пускорегулирующей аппаратуры

$$P_{pusk}(t) = \exp[\lambda_{pusk} \cdot t];$$

вероятностное экспоненциальное распределение безотказности системы защиты от перегрузок

$$P_{zaschita}(t) = \exp[-\lambda_{zaschita} \cdot t];$$

вероятностное экспоненциальное распределение безотказности механизма передачи

$$P_{meh}(t) = \exp[\lambda_{meh} \cdot t].$$

Данные по вероятностным распределениям взяты из [5]. Интенсивности отказов соответствующих узлов в соответствии с [1; 5] примем в виде

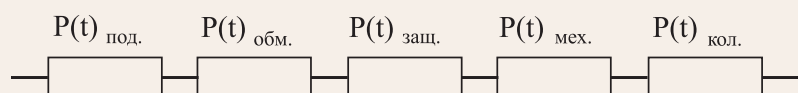
$$\lambda_{pod} = 0,4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{час}}; \lambda_{zaschit} = 0,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\lambda_{pusk} = 0,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}; \lambda_{meh} = 5,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{час}};$$

$$T_{srk} = 2500; \sigma_{srk} = 450; \mu_0 = 12,5; \sigma_{\mu_0} = 1,6.$$

Численные значения вероятностей с указанными параметрами распределениями по каждому узлу определяются выражениями:  $P_{pod}(2000) = 0,992$ ;  $P_{pusk}(2000) = 0,994$ ;  $P_{obm}(2000) = 0,999$ ;  $P_{kol}(2000) = 0,867$ .

Результирующая вероятность безотказной работы синхронного генератора составляет  $P_{res}(2000) = 0,835$  в течение



**Рис. 4. Структурная надежность схема синхронного электрогенератора**

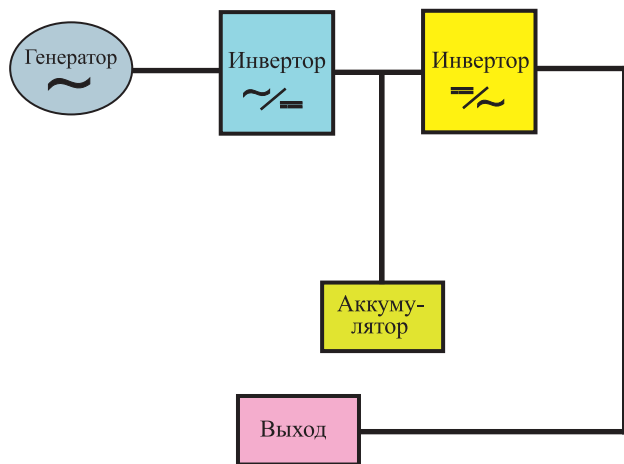


Рис. 5. Обобщенная схема микротурбинного электрогенератора

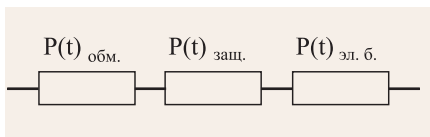


Рис. 6. Структурная надежность схема микротурбинного электрогенератора

ние времени  $t = 2\ 000$ . Время  $t = 2\ 000$  выбрано из соображений максимальной приемлемой надежности коллекторного узла. Большее время для оценки выбирать нельзя, поскольку тогда коллектор полностью выходит из строя. Если убрать из схемы коллектор, то вероятность работоспособного состояния синхронного генератора за время  $t = 10\ 000$  выражается величиной  $P_{res}(10\ 000) = 0,726$ .

Модель надежности микротурбинного электрогенератора не включает в себя вращающихся механических частей, находящихся во взаимном трении. В качестве преобразующих и управляющего устройств используются силовые полупроводниковые устройства, цифровые преобразователи высокой надежности (рис. 5).

Параметры модели надежности необходимо скорректировать для существующей модели микротурбинного электрогенератора [1]. С учетом вышесказанного построим структурную надежность схему микротурбинного электрогенератора, включив в нее только основные элементы (рис. 6).

Математическая модель микротурбинного электрогенератора имеет вид

$$P_{res}(t) = P_{obm}(t) \cdot P_{push}(t) \cdot P_{zaschit}(t).$$

Параметры интенсивностей отказов соответствующих элементов в соответствии с [1] имеют вид

$$\lambda_{zaschit} = 0,51 \cdot 10^{-6}; \lambda_{push} = 1,3 \cdot 10^{-7}; \mu_0 = 12,8; \sigma_{\mu_0} = 1,1$$

$$P_{res}(10\ 000) = 0,993.$$

Таким образом, анализ надежности (рис. 7) показывает значительное превышение вероятности безотказной работы МГ. Численно это выражается коэффициентом повышения надежности или снижения отказности  $K_{out} = \frac{1 - P_{sinres}(10000)}{1 - P_{microres}(10000)}$  за время работы

$t = 10\ 000$  МГ по сравнению с обычным синхронным генератором. Величина коэффициента составляет  $K_{out} = 39,143$ .

Кроме увеличения надежности современных электростанций на основе микротурбин по сравнению с обычными генераторами преимущество первых состоит в способности работать с попутными газами без специальной обработки, т. е. после грубой механической очистки, а также с низкокалорийными, жирными, сернистыми газами и с газами переменного компонентного состава и калорийности, тогда как газопоршневые установки могут работать на газе с содержанием серы до 0,1 % и только при условии замены масла приблизительно каждые 90 дней. На наш взгляд, это свойство МГ позволит использовать их на морских добывающих платформах, где можно применять попутный газ. Кроме того, в отличие от газопоршневых установок, микротурбины функционируют на пропан-бутане без риска повреждения двигателя и ограничений по мощности.

На большинстве объектов за работой газопоршневых установок круглосуточно следит дежурная смена в составе 1–3 чел. Микротурбинная электростанция работает в полностью автоматическом режиме и не требует постоянного присутствия обслуживающего персонала, что также снижает расходы на ее содержание. Автоматизированная система мониторинга и управления дает возможность удаленного контроля посред-

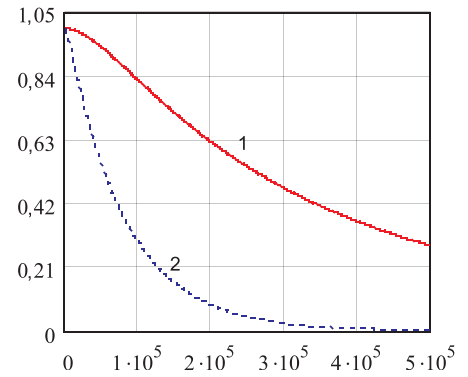


Рис. 7. Зависимость результирующей вероятности безотказной работы (надежности) микротурбинного электрогенератора (1) от времени в сравнении с обычным синхронным генератором (2)

ством микропроцессорной системы автоматического управления. Это позволяет размещать микротурбины в труднодоступных районах и на необслуживаемых объектах, таких как удаленные радиорелейные станции и радиолокационные посты, следящие за передвижением и стоянками судов [1; 4].

Таким образом, несмотря на то что микротурбины появились значительно позднее другого энергогенерирующего оборудования, они успели зарекомендовать себя в качестве надежного и эффективного источника энергии. На сегодняшний день в России микротурбинные установки используются при обустройстве нефтегазовых месторождений, объектов газотранспортной инфраструктуры и организации энергоснабжения труднодоступных объектов. Высокая надежность и автономность микротурбинных генераторов позволит электрифицировать речные причалы даже небольших поселков, оживить транспортные потоки малых судов по рекам России, ввести в строй современные навигационные объекты. При этом можно экономить на капитальных затратах не только в краткосрочной перспективе, но и в течение всего срока эксплуатации оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков А. Ф. Малая энергетика. Проблемы и перспективы: моногр. — М.: Энергопрогресс, 2003.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: монография. — М.: Наука, 1973.
3. Заблоцкий Н. Д., Сипенков И. Е., Филиппов А. Ю. К 50-летию школы газовой смазки Л. Г. Лойцянского // Науч.-технич. ведомости. — 2004. — № 2. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика. — (К 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика» ЛПИ).
4. Конструкция микротурбин Capstone. — URL: <http://www.mttby.com/index2-01.html>.
5. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. — М.: Изд. дом МЭИ, 2006.