

УДК 621.311.236
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-20-26

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.А. Костин, И.О. Кудашева, М.С. Губатенко

Аннотация. Описываются варианты повышения надежности систем энергоснабжения автономных объектов различного назначения с использованием средств малой энергетики, таких как электростанции на базе двигателей внутреннего сгорания. Первый вариант – применение резервных агрегатов, включающихся в работу при выходе из строя одного из основных, или для покрытия пиковых нагрузок. Вторым вариантом является повышение надежности самого двигателя за счет применения современных материалов и методов обработки деталей. К ним относятся методы поверхностного пластического деформирования, использование поверхностно-активных веществ, а также применение сплавов на основе алюминия и меди, обладающих более высокой теплостойкостью по сравнению с чугунами и сталями. Это позволит повысить надежность энергоснабжения различных объектов энергопотребления, что особенно актуально в современных условиях.

Ключевые слова: малая энергетика; дизельные электростанции; автономные объекты; двигатель внутреннего сгорания; цилиндро-поршневая группа; поверхностно-активные вещества; поверхностно-пластическое деформирование.

ИЧКИ КҮЙҮҮЧҮ КЫЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫН НЕГИЗИНДЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫК КОМПЛЕКСТЕРДИН ИШЕНИМДҮҮЛҮГҮН ЖОГОРУЛАТУУНУН ЖОЛДОРУ

Д.А. Костин, И.О. Кудашева, М.С. Губатенко

Аннотация. Макалада чакан энергетикалык объектилерди, мисалы, ичтен күйүүчү кыймылдаткычтардын негизиндеги электр станцияларын пайдалануу менен ар кандай максаттар үчүн автономдуу объекттерди электр менен жабдуу системаларынын ишенимдүүлүгүн жогорулатуунун варианттары баяндалат. Биринчи вариант – негизги агрегаттардын бири иштебей калганда же эң жогорку жүктөрдү жабуу үчүн ишке кирген резервдик агрегаттарды колдонуу. Экинчи вариант – заманбап материалдарды жана тетиктерди иштетүү ыкмаларын колдонуу менен мотордун ишенимдүүлүгүн жогорулатуу. Аларга беттик пластикалык деформациялоо методдору, беттик активдүү заттарды колдонуу, ошондой эле чоюндарга жана болотторго караганда ысыкка туруктуулугу жогору алюминий жана жез негизиндеги эритмелерди колдонуу кирет. Бул ар кандай энергия керектөөчү объектилерди электр менен жабдуунун ишенимдүүлүгүн жогорулатат, бул заманбап шарттарда өзгөчө маанилүү.

Түйүндүү сөздөр: чакан энергетика; дизелдик электр станциялары; автономдуу объектилер; ички күйүүчү кыймылдаткыч; цилиндр-поршень тобу; беттик активдүү заттар; бетинин пластикалык деформациясы.

WAYS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF ENERGY COMPLEXES BASED ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES

D.A. Kostin, I.O. Kudasheva, M.S. Gubatenko

Abstract. The article describes options for improving the reliability of power supply systems for autonomous facilities for various purposes using small-scale energy, such as power plants based on internal combustion engines. The first option is the use of backup units that come into operation when one of the main ones fails or to cover peak loads. The second option is to increase the reliability of the engine itself through the use of modern materials and methods of processing parts. These include methods of surface plastic deformation, the use of surfactants, as well as the use of aluminum and

copper-based alloys with higher heat resistance compared to cast iron and steel. A set of these measures will improve the reliability of energy supply to various energy consumption facilities, which is especially important in modern world conditions.

Keywords: small power engineering; diesel power plants; autonomous objects; internal combustion engine; cylinder-piston group; surfactants; surface plastic deformation.

В настоящее время вопросы надежности энергоснабжения объектов различных отраслей экономики приобретают все большую актуальность. Промышленные объекты, объекты городской инфраструктуры, обеспечивающие жизненно важные потребности города, объекты связи, телевидения и радиовещания, некоторые объекты транспорта, медицинские учреждения не могут остаться без электроснабжения.

Обеспечение электроснабжением объектов различного назначения, в том числе и военной инфраструктуры, является важным фактором обеспечения энергетической безопасности конкретной территории и объектов на них.

Одним из способов решения этой проблемы является применение средств малой энергетики, таких как электростанции на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Преимуществом таких энергетических установок является их независимость от централизованных систем. Это в большей степени относится к дизельным электростанциям, в связи с наличием у них некоторых преимуществ. Наиболее эффективными в данном случае будут дизельные энергоустановки, обеспечивающие комбинированную выработку электрической и тепловой энергии за счет утилизации тепловых потерь (по принципу когенерации). Эти электростанции обеспечивают объект не только электроэнергией, но и теплом. Также повышению эффективности применения данных установок способствует возможность переоборудования их на альтернативные виды топлива, таких как биогаз, попутный газ нефтяных месторождений, сжиженные углеводородные газы.

На сегодняшний день двигатели внутреннего сгорания и энергетические установки мощностью от 2 до 25000 кВт, а также составляющие их узлы и детали производятся на более чем тридцати двух специализированных предприятиях РФ [1].

Важную роль при использовании когенерационных установок с ДВС играет определение оптимального количества агрегатов в энергетическом комплексе. Опыт эксплуатации таких энергоустановок позволяет сделать вывод, что наиболее рациональным количеством агрегатов в комплексе будет три основных агрегата и один резервный, относящихся к одному типу с целью повышения унификации применяемого оборудования.

Применение резервного агрегата позволяет рационально повысить надежность всего комплекса. То есть, в этом случае осуществляется реализация скользящего метода резервирования, а именно, включение в комплекс элемента, который может выступать в качестве дублирующего основной элемент [1].

Для того чтобы рассчитать вероятность отказа комплекса при таком способе резервирования, необходимо произвести расчет надежности систем типа « m из n ». Пусть система состоит из n элементов, и система работоспособна только в том случае, если работоспособны любые m элементов, а отказ системы происходит, если работоспособными останутся менее m элементов [1].

Рассмотрим все возможные состояния системы из четырех агрегатов и определим вероятности каждого состояния системы (таблица 1) [1].

Рассчитаем вероятность безотказной работы всей системы из четырех агрегатов. В этом случае необходимо рассмотреть сумму вероятностей работоспособных состояний: 1, 2, 3, 5, 9.

$$P_f = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4,$$

где p – вероятность безотказной работы агрегатов; q – вероятность отказа агрегатов.

Таблица 1 – Состояния системы «3 из 4»

№ состояния	Состояние элементов				Состояние системы	Вероятность состояния системы
	1	2	3	4		
1	+*	+	+	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$
2	+	+	+	-**	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4$
3	+	+	-	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4$
4	+	+	-	-	-	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4$
5	+	-	+	+	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4$
6	+	-	+	-	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4$
7	+	-	-	+	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4$
8	+	-	-	-	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4$
9	-	+	+	+	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$
10	-	+	+	-	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4$
11	-	+	-	+	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4$
12	-	+	-	-	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4$
13	-	-	+	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4$
14	-	-	+	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4$
15	-	-	-	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4$
16	-	-	-	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4$

*+ – рабочее состояние; ** – неисправное состояние.

Взаимосвязь вероятности отказа и вероятности безотказной работы агрегатов системы определяется следующим образом:

$$q = 1 - p.$$

В данном случае, а также в процессе эксплуатации рационально использовать однотипные агрегаты, имеющие одинаковые характеристики надежности с целью повышения уровня унификации комплекса энергоустановок и удобства их эксплуатации [1].

Рассмотрим некий момент времени t , когда надежность агрегатов комплекса составит: $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0,99$ (вероятность безотказной работы 99 %). Рассчитаем вероятность безотказной работы комплекса энергоустановок с различным количеством агрегатов.

Для комплекса, состоящего из трех агрегатов (система «3 из 3»), вероятность безотказной работы определяется как:

$$P_f = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = p^3 = 0,99^3 = 0,970.$$

Таким образом, вероятность отказа комплекса «3 из 3»:

$$Q_f = 1 - P_f = 1 - 0,970 = 0,03.$$

Вероятность безотказной работы комплекса, состоящего из четырех энергоустановок, определится как:

$$P_f = p^4 + p^3(1-p) + p^3(1-p) + p^3(1-p) + p^3(1-p) = \\ = 4p^3 - 3p^4 = 4 \cdot 0,99^3 - 3 \cdot 0,99^4 = 0,9994.$$

Таким образом, вероятность отказа такого комплекса:

$$Q_f = 1 - P_f = 1 - 0,9994 = 0,0006.$$

С целью повышения надежности электроснабжения для высокоответственных потребителей, можно включить в комплекс энергоустановок пять агрегатов (система «3 из 5»), т. е. рассматривать в качестве резервных два агрегата.

Вероятность безотказной работы такой системы:

$$P_f = 10p^3 - 15p^4 + 6p^5 = 10 \cdot 0,99^3 - 15 \cdot 0,99^4 + 6 \cdot 0,99^5 = 0,99999.$$

Вероятность отказа этой системы:

$$Q_f = 1 - P_f = 1 - 0,99999 = 0,00001.$$

В качестве резервного источника электроснабжения автономного объекта также может выступать и централизованная система энергоснабжения.

В нормативном документе МО РФ [2] пункт 8.7.1 гласит: «Для базовых ЭС наличие СКУТ (системы комплексной утилизации теплоты) является обязательным. ЭС и СКУТ представляют собой единый энергокомплекс – электротеплостанцию (ЭТС) – источник электрической и тепловой энергии». Далее там же в пункте 8.7.2 говорится о том, что «утилизированная теплота отработавших газов и жидкости, охлаждающей зарубашечное пространство ДВС, наддувочного воздуха и моторного масла используется для замещения теплогенерирующих (котельных) установок, а также холодоснабжения объекта с целью снижения затрат на энергообеспечение объекта путем комбинированной выработки требуемых видов энергии».

Следует отметить, что актуальным вопросом является также и повышение надежности самих энергетических установок. На надежность энергетических установок влияет качество изготовления и надежность составляющих их узлов и деталей.

С целью повышения эксплуатационной надежности энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания применяется, как один из способов, поверхностное пластическое деформирование на финальных стадиях обработки. Оно обеспечивает снижение внутренних остаточных напряжений деталей, и этот способ формирует предварительное напряженно-деформированное состояние материала поверхностных слоев прецизионных деталей. Это в процессе работы позволяет частично компенсировать рабочие нагрузки, а следовательно, повысить эксплуатационную надежность на завершающих стадиях обработки таких деталей [3].

Также повышению надежности способствует использование современных технологий для изготовления ответственных деталей двигателя, например, деталей поршневой группы.

В дизельных двигателях верхняя кольцевая канавка поршня (рисунок 1) находится под воздействием повышенных нагрузок, так как в зоне работы присутствует высокая температура и давление. Поэтому верхнюю кольцевую канавку поршня формируют специальной стальной кольцевой вставкой, устанавливаемой при изготовлении поршня литьем (эскиз поршня показан на рисунке 1).

Материал вставки подбирается так, чтобы тепловое расширение в зоне кольцевой вставки было незначительным, а работа поршневого кольца при этом в стальной «окантовке» становится более



Рисунок 1 – Вставка для поршневого кольца
в поршне дизельного двигателя

Таблица 2 – Материалы для блоков цилиндров

Группа сплавов	Основной материал	Способ изготовления*	Плотность, кг/дм ³
AlSi ₁₂ CuMgNi	Алюминий	К, W – P, W	2,7
AlSi ₁₈ CuMgNi	Алюминий	К, W – P, W	2,68
AlSi ₂₅ CuMgNi	Алюминий	К, W	2,65
AlCu ₄ NiMg	Алюминий	К, W	2,74
Нелегированный	Чугун	S	7,3
Легированный	Чугун	S, W	7,3

*Способ изготовления: К – литье в кокиль; W – прессование (Squeeze Casting); P – литье под давлением; S – литье в формовочную смесь.

эффективной. Вследствие этого снижается износ поршневой канавки, при этом повышается в целом ресурс всего поршня.

Блоки цилиндров двигателей большой мощности (150 кВт и более) изготавливают из чугуна. Такой материал имеет невысокую стоимость, но высокую прочность и жёсткость в сочетании с хорошими литейными качествами. Также, если использовать хонингование, как метод обработки внутренних рабочих поверхностей цилиндров, возможно снизить степень износа пары «поршень – втулка», так как надёжность смазки рабочих поверхностей повышается.

Однако в качестве одного из недостатков чугуна необходимо отметить его большую массу (в 2,7 раза тяжелее алюминия) и низкую теплопроводность, склонность сплавов чугуна к коррозии. Но чугунный блок, в силу своей жесткости, обеспечивает более высокую степень формирования. Двигатель с чугунным блоком быстрее прогревается до рабочей температуры, чем, например, алюминий, и имеет вдвое большую теплоемкость.

Стремление моторостроительных производств к созданию более легких двигателей привело к использованию в конструкции блоков цилиндров из сплавов алюминия. Особенно это касается автомобильных и мотоциклетных двигателей. Различные варианты таких сплавов представлены в таблице 2 [4].

Анализ свойств материалов и условий работы поршней в ДВС позволили сформулировать требования к материалам при изготовлении поршней:

- малая плотность;
- высокая теплопроводность;
- малое тепловое расширение;
- коэффициент теплового расширения материала поршня должен быть меньше, чем у материала цилиндра;
- высокая теплостойкость;
- высокая сопротивляемость деформации и усталостному разрушению.

Повышенную теплостойкость и теплопроводность имеют сплавы алюминия с медью. В таких сплавах также содержатся незначительные количества магния и никеля. Но, так как такие сплавы обладают недостаточной износостойкостью и имеют высокое тепловое расширение материала, область их применения довольно ограничена [4].

При изготовлении поршней применяется сплав алюминия с 12–25 % кремния, чуть более 1 % меди, никеля и магния, а также незначительное содержание железа, титана и цинка (менее 1 %). Увеличение износостойкости материала и снижение теплового расширения изделия возможно добиться путем увеличения содержания кремния в сплаве. В двигателях с высокой тепловой нагрузкой применяются поршни с высоким содержанием кремния [5].

Поршни преимущественно изготавливаются методом литья в кокиль. В случае повышенных механических и термических нагрузок, поршни изготавливаются прессованием в горячем состоянии. Материал в исходную форму заготовки (непрерывное литьё) выжимается в несколько этапов с помощью гидравлических или механических прессов [5].

На основании изложенного выше можно отметить следующее. Для повышения надежности энергетических комплексов на базе ДВС и, как следствие, надежности энергоснабжения различных объектов возможно применение двух способов. Первый способ – использование резервных агрегатов, которые задействуются в случае выхода из строя одного из основных или для обеспечения электропитания при пиковых нагрузках. В этом случае при применении четырех агрегатов (что является оптимальным) или трех агрегатов и в качестве резерва централизованной системы энергоснабжения, вероятность безотказной работы энергетического комплекса составит 99,94 % что является достаточно высоким показателем надежной работы.

Вторым способом является повышение надежности самого двигателя за счет применения современных материалов и методов обработки деталей. К ним относятся: методы поверхностного пластического деформирования, использование поверхностно-активных веществ, а также применение сплавов на основе алюминия и меди, обладающих более высокой теплостойкостью по сравнению с чугунами и сталями. При этом также повышается и срок эксплуатации двигателя, а следовательно, и энергоустановки в целом, увеличивается межремонтный период.

Таким образом, повышение уровня надежности и вероятности безотказной работы энергетических комплексов на базе ДВС за счет применения современных материалов и более совершенной технологии изготовления, а также использование необходимого количества резервных агрегатов является актуальной задачей. Однако необходимо заметить, что экономическая эффективность применения этих вариантов зависит от множества факторов, начиная от возможных применяемых материалов для изготовления и прогнозируемой нагрузки, и заканчивая сравнительной характеристикой стоимости закупки необходимого количества агрегатов энергетического комплекса и стоимости изготовления таких агрегатов повышенной надежности, что является, по сути, отдельным вопросом, требующим отдельного рассмотрения.

Наиболее перспективным представляется применение обоих предложенных вариантов повышения уровня надежности энергетических комплексов на базе ДВС, связанных как с использованием современных материалов и методов изготовления, так и применением необходимого количества резервных агрегатов.

Поступила: 19.09.22; рецензирована: 03.10.22; принята: 05.10.22.

Литература

1. *Разуваев А.В.* Повышение надёжности энергоснабжения автономного объекта / А.В. Разуваев, С.В. Мурин, Д.А. Костин // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. № 6. С. 23–25.
2. *Сайданов В.О.* Ведомственный свод правил ВСП 43-02-05/МО РФ: Правила проектирования стационарных электростанций с двигателями внутреннего сгорания объектов военной инфраструктуры / В.О. Сайданов, В.А. Путятинский, А.Н. Агафонов, А.В. Разуваев и др. М.: Изд-во Минобороны, 2005. 93 с.
3. Повышение надёжности узлов и деталей ДВС, входящих в состав мини-ТЭЦ / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, Т.И. Перельгина // Вестник КPCУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 56–58.
4. Цилиндропоршневая группа и кривошипно-шатунный механизм. URL: https://bstudy.net/955500/tehnika/tsilindroporshnevaya_gruppa_krivoshipno_shatunnyy_mehanizm (дата обращения: 28.08.2022.)
5. Кривошипно-шатунный механизм. URL: http://appo-jurn.narod.ru/glava_33.pdf (дата обращения: 28.08.2022.)