

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УРАВНОВЕШЕННОСТИ ВЫСОКОБОРОТИСТЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

© 2023

- П. Д. Рекадзе** кандидат технических наук, инженер-конструктор НИИ-201 (Институт акустики машин) института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; rekadze.pd@ssau.ru
- С. Ю. Сычугов** руководитель СКБ ДЛА института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sychugov.sy@ssau.ru
- В. С. Мелентьев** кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; kipdla223@ssau.ru
- Л. В. Родионов** кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; rodionov.lv@ssau.ru

Представлены результаты работ по адаптации метода Гаевского-Жидкова и разработке стендового комплекса для оценки уравновешенности высокооборотистых малоразмерных двигателей внутреннего сгорания, а также характеристики холостого хода, винтовой характеристики и внешней скоростной характеристики двигателя внутреннего сгорания. Основной целью является разработка конструкции стендового комплекса, обеспечивающего высокую точность, повторяемость измерений и возможность испытывать микроДВС с рабочим объёмом до 3,5 см³ на частотах вращения вала до 37 000 об/мин. Стендовый комплекс позволяет определять характеристику «двигатель-винт», характеристику холостого хода, а также проводить быструю перенастройку стенда при изменении конструкции ДВС. Подобран электродвигатель с оптимальными параметрами, позволяющий определять серии характеристик «двигатель-винт» и характеристику холостого хода. Проведено экспериментальное исследование, в результате которого определены винтовые характеристики семи винтов, характеристика холостого хода для базового электродвигателя и электродвигателя с дисбалансом. Расчётным способом с использованием экспериментальных данных определена внешняя скоростная характеристика двигателя внутреннего сгорания с рабочим объёмом 2,5 см³. Рассчитана погрешность измерения мощности на стенде и относительное отклонение мощности в эксперименте.

Уравновешенность; двигатель внутреннего сгорания; стендовый комплекс; бесконтактный способ; внешняя скоростная характеристика; винтовая характеристика

Цитирование: Рекадзе П.Д., Сычугов С.Ю., Мелентьев В.С., Родионов Л.В. Экспериментальный метод оценки уравновешенности высокооборотистых малоразмерных двигателей внутреннего сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 133-142.
DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-133-142

Введение

К типовым характеристикам двигателя относят скоростные, нагрузочные, регуляторные, характеристики внутренних потерь и холостого хода (XXX). Скоростной характеристикой двигателя называется зависимость изменения эффективной мощности,

крутящего момента, удельного и часового расходов топлива от частоты вращения коленчатого вала при постоянном положении рычага управления подачей топлива. Если канал подвода воздуха максимально открыт, то скоростную характеристику называют «внешней». Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) представляет собой верхнюю границу поля эксплуатационных режимов работы двигателя, на режимах ВСХ двигатель испытывает максимальные тепловые и механические нагрузки.

Для скоростных кордовых моделей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) наибольшую значимость имеет ВСХ, поскольку в этом случае главная цель – достижение наибольших значений скорости модели в ограниченном временном интервале [1].

Например, одноцилиндровые калильные микродвигатели с рабочим объёмом $2,5 \text{ см}^3$ характеризуются относительно малыми габаритами в пределах $105+260$ (труба) $\times 40\times 70$ мм. Начиная с 1960-х гг. максимальные скорости кордовых моделей с такими двигателями были порядка 125 км/ч, в 1990-х гг. достигали 250 км/ч, а на 2023 г. достигают 295 км/ч при числе оборотов при максимальной мощности в диапазоне 38...40 тыс. об/мин.

При этом возрастают требования к точности измерений параметров моделей. Наилучшие внешние характеристики двигателя внутреннего сгорания достигаются путём совершенствования его конструкции и процессов в его узлах: уменьшения трения в подшипниках, уравниванием коленвала, применением резонансной трубы.

Анализ теоретических и экспериментальных способов определения ВСХ

Метод стендовых стандартизованных испытаний

Оценку степени улучшения характеристик двигателя внутреннего сгорания возможно проводить расчётными способами [2; 3] или методами стендовых испытаний [4; 5]. При использовании расчётных моделей не представляется возможным получать результаты с высокой точностью [6]. Математическое моделирование характеристик двигателей внутреннего сгорания выполняют с использованием основных зависимостей теории двигателей в сочетании с использованием эмпирических математических моделей, полученных при многофакторных испытаниях конкретных двигателей. Это несколько ограничивает возможности математического моделирования, так как позволяет получать качественное протекание характеристик и количественное соответствие при относительно небольшой экстраполяции параметров двигателей и режимов его работы за пределы условий, в которых были получены эмпирические модели, поэтому такой подход используют, как правило, при предварительных конструкторских и сравнительных расчётах. Методами стендовых испытаний можно учесть намного большее число факторов. В то же время для испытаний высокооборотистых малоразмерных двигателей внутреннего сгорания, предназначенных для получения максимальных удельных характеристик в полёте, стендовые и теоретические методы не обладают необходимым уровнем достоверности. Поэтому необходимо как повышать точность измерений параметров рабочих процессов, минимизировать влияние средств измерений на балансировку и приемистость ДВС, так и использовать достоверные методы при определении ВСХ.

Метод с использованием эмпирических зависимостей

Теоретическую оценку состояния ДВС возможно проводить расчётными способами [2]. Для построения ВСХ ДВС в [2] приводится методика с использованием эмпирических зависимостей:

$$N_{ex} = N_{en} \left[a \frac{n_x}{n_N} + b \left(\frac{n_x}{n_N} \right)^2 - c \left(\frac{n_x}{n_N} \right)^3 \right],$$

где N_{ex} и n_x – эффективная мощность и частота вращения коленчатого вала в искомой точке ВСХ ДВС; N_{en} и n_N – номинальная эффективная мощность и частота вращения коленчатого вала при номинальной мощности; a, b, c – коэффициенты, зависящие от типа и конструктивных особенностей двигателя.

Следует отметить, что рассчитанная по данной методике ВСХ, как правило, не совпадает с ВСХ конкретных моделей двигателей, полученных экспериментальным путём [2].

Метод определения ВСХ с использованием сменных винтов

Классическое определение винтовой характеристики (ВХ) подразумевает зависимость эффективной мощности двигателя от частоты вращения вала при его работе с нагрузкой (винтом). В [1; 5; 7] описан метод определения ВСХ микродвигателя с использованием сменных винтов (или винта с переменным шагом).

Суть метода состоит в определении собственной ВСХ ДВС и разделении её от винтовой характеристики. Алгоритм метода определения собственной ВСХ двигателя внутреннего сгорания следующий:

1) экспериментальное определение мощностной характеристики взаимодействия системы «электродвигатель – винт» $N_{ЭД-Вi}(n)$ с использованием заданного количества винтов в диапазоне частот испытания ДВС $n_{\min} \dots n_{\max}$;

2) экспериментальное определение мощностной ХХХ $N_{ХХ}(n)$ электродвигателя на вспомогательном стенде (при снятом винте);

3) расчётное определение винтовых (собственных) характеристик по формуле $N_{Вi}(n) = N_{ЭД-Вi}(n) - N_{ХХ}(n)$. Формирование функций $N_{Вi}(n)$ винтов;

4) экспериментальное определение максимальных оборотов ДВС с установленными винтами и регистрация значений частоты вращения системы «ДВС – винт» $n_{\max. i}$ при i -м винте;

5) построение ординат собственной ВСХ ДВС $N_{ДВС}(n)$ через совмещённый график: из абсциссы $n_{\max. i}$ с использованием вспомогательной кривой $N_{Вi}(n)$ формируется ордината характеристики $N_{ДВСi}(n)$, и такие построения проводятся для всех винтов. Далее по полученным координатам ($n_{\max. i}, N_{ДВСi}(n)$) формируется график собственной ВСХ ДВС $N_{ДВС}(n)$.

Реализация описанного метода по ряду технических причин ранее была затруднительна, т. к. использование косвенного контактного способа при измерении крутящего момента двигателя, работающего с винтом (на балансирном стенде) ввиду малой жёсткости стенда, непостоянства реактивного момента и повышенной виброакустической нагруженности стенда приводило к зависимости результатов измерений от многих факторов и повышенной неопределённости измерений.

Постановка целей и задач

Целью настоящей работы является адаптация метода стендовых испытаний, описанного в [8] и разработка стендового комплекса для высокооборотистых ($10 \cdot 10^3 > n > 37 \cdot 10^3$) малоразмерных (объёмом $1,5 > V > 3,5 \text{ см}^3$) ДВС. При этом должны выполняться следующие условия:

- 1) обеспечение точности измерений, достаточных для измерения влияния уравновешенности коленвала на частоту вращения и мощность двигателя внутреннего сгорания;
- 2) минимизация дисбаланса измерительного комплекса;
- 3) высокая повторяемость результатов измерений;
- 4) быстрая перенастройка стенда при изменении конструкции двигателя внутреннего сгорания, установка сменных модулей;
- 5) увеличение надёжности и долговечности электродвигателя, доведение частоты вращения вала электродвигателя до 37 000 об/мин.

Для достижения поставленной цели был решен ряд задач:

- 1) проанализированы особенности известных способов определения ВСХ;
- 2) разработана система определения частоты вращения вала бесконтактным способом;
- 3) разработан экспериментальный стендовый комплекс для определения внешней скоростной характеристики бесконтактным способом.

Стендовый комплекс включает в себя стенд с электродвигателем для определения ВХ и стенд с исследуемым ДВС для определения ВСХ. Разработанный стендовый комплекс для определения ВХ и ВСХ ДВС с рабочим объёмом до $3,5 \text{ см}^3$ представлен на рис. 1.

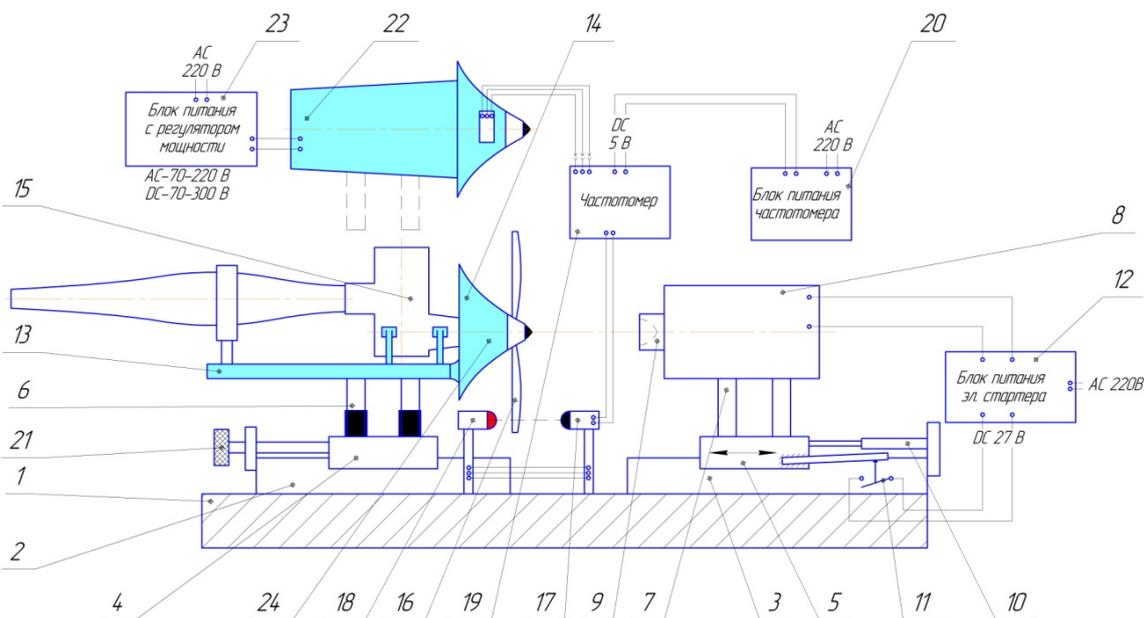


Рис. 1. Универсальный экспериментальный стенд для исследований ВХ и ВСХ:

- 1 – основание; 2 – призматическая направляющая; 3 – призматическая направляющая стартера; 4 – подвижная платформа; 5 – подвижная платформа стартера; 6 – демпферная опора (3 шт.); 7 – опора стартера (4 шт.); 8 – эл. стартер; 9 – муфта фрикционная; 10 – механизм возврата эл. стартера; 11 – система запуска эл. стартера; 12 – блок питания эл. стартера; 13 – моторама ДВС; 14 – воздушный отбойник потока; 15 – микроДВС; 16 – воздушный винт; 17 – инфракрасный излучатель; 18 – инфракрасный приёмник; 19 – частотомер; 20 – блок питания частотомера; 21 – узел продольной фиксации подвижной платформы; 22 – электродвигатель; 23 – блок питания с регулятором мощности; 24 – датчик опто-пары

Посредством выбора электродвигателя и использования бесконтактного способа измерения параметров мощности и частоты вращения вала был устранён дисбаланс и обеспечена незначительная виброакустическая нагруженность измерительного комплекса, что подтверждалось малой вибрацией основания.

На стендовом комплексе возможно испытывать технический объект (ДВС) при следующих параметрах стендового комплекса: диапазон частоты вращения: 10 000...37 000 об/мин (обеспечено электродвигателем мощностью 0,7 кВт); рабочий объём ДВС 1,5...3,5 см³; диаметр винта до 160 мм.

Разработанный стенд позволяет определять: ХХХ электродвигателя, ВХ, ВСХ двигателя внутреннего сгорания.

Преимущества разработанного стенда:

1. Увеличена надёжная и долговечная работа электродвигателя, а также расширен диапазон частоты вращения вала электродвигателя до 37 000 об/мин за счёт:

- использования электродвигателя с «пропитанной» изоляцией обмоток якоря;
- использования специальных вибро- и пылезащищённых подшипников;
- обеспечения динамической уравновешенности ротора.

2. Использование бесконтактного способа измерения параметров мощности (через ток и напряжение) и частоты вращения вала (через оптопару).

3. Малая относительная инструментальная погрешность δ , которая составляет:

- при напряжении $U_{\max} = 220$ В: $\delta_U = 1,5\%$;
- при токе $I_{\max} = 2,9$ А: $\delta_I = 1,5\%$;
- при частоте вращения $n_{\max} = 37 000$ об/мин: $\delta_n = 0,162\%$.

То есть при определении мощности относительная инструментальная погрешность составляет $\delta_N = \delta_U + \delta_I = 3\%$.

Экспериментальные исследования и расчёт внешней скоростной характеристики микроДВС

Определение винтовых характеристик

Анализ работоспособности стенда и измерительного комплекса проводился на базовом электродвигателе и электродвигателе с дисбалансом. Такая постановка позволяет оценить стабильность ВХ одной партии винтов, определённых на различных электродвигателях (с дисбалансом и без), а также относительное изменение мощности.

Исследование проводилось по алгоритму:

1) сначала определялась ХХХ базового электродвигателя, далее – характеристики для семи систем «винт – электродвигатель» и на основе их разницы построены ВХ согласно методике [8];

2) далее на электродвигателе реализовывался дисбаланс (устанавливался грузик массой $m = 0,24$ г, расположенный на расстоянии $r = 19$ мм от оси вала, рис. 2). Центробежная сила при таком дисбалансе составляет $F_{цб} (n = 26 000 \text{ об/мин}) = 33,8$ Н и $F_{цб} (n = 37 000 \text{ об/мин}) = 68,5$ Н. Масса m и радиус r выбраны исходя из предварительного расчёта, показывающего границы чувствительности измерительного комплекса стенда. По предварительным расчётам определена оптимальная масса противовеса кривошипно-шатунного механизма на примере одноцилиндрового ДВС объёмом 2,5 см³, равная 3 г. В настоящей работе масса грузика m выбрана заведомо намного меньше массы противовеса с целью определения граничных возможностей измерительной части стенда. Затем аналогично были определены характеристики по п. 1;

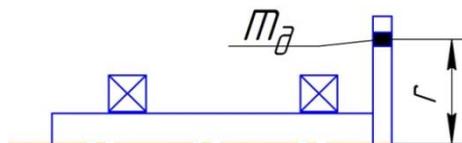


Рис. 2. Схема размещения дисбалансного грузика на электродвигателе

3) на основе результатов пунктов 1 – 2 оценивалось относительное отклонение значений мощности от значения на базовом электродвигателе и сравнивалось с расчётной приборной погрешностью.

ВХ были определены на максимальной частоте 26 000 об/мин, результаты анализа ВХ представлены в табл. 1. На рис. 3 приведён график потребляемой мощности базового электродвигателя и электродвигателя с дисбалансом.

Таблица 1. Потребляемая мощность винтов

Номер винта	Частота вращения вала, об/мин	Мощность, полученная на базовом электродвигателе, Вт	Мощность, полученная на электродвигателе с дисбалансом, Вт	Относительное отклонение, %
№1	26 000	584	592	1,33
№2		888	868	2,26
№3		1013	972	3,99
№4		1130	1066	5,70
№5		1234	1333	8,01
№6		1272	1263	0,73
№7		1425	1420	0,33
<i>Холостой ход (без винта)</i>				
–	26 000	59,3	70,5	18,99
–	37 000	340	477	40,26

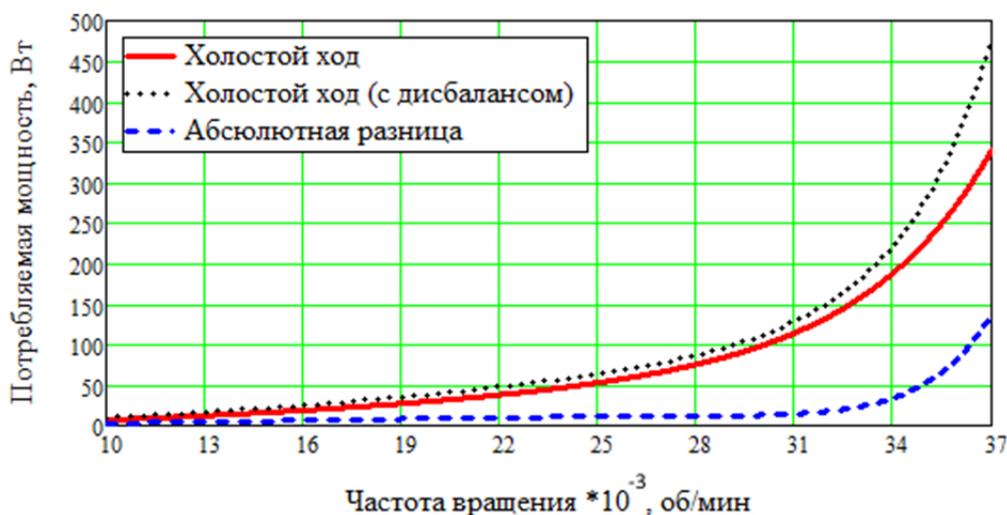


Рис. 3. Потребляемая мощность электродвигателя на холостом ходу

На максимальной частоте вращения вала среднее относительное отклонение от значения на базовом электродвигателе не превысило 3%. Малое различие в относительных отклонениях показывает, что влияние электродвигателя (с дисбалансом и без) на ВХ незначительно. Из графиков на рис. 3 можно сделать вывод, что возможно

отслеживать потребляемую мощность трения на уровне 3...40 Вт (при $n = 10\ 000...37\ 000$ об/мин).

Относительное отклонение от значения на базовом электродвигателе в эксперименте $\varepsilon_{\text{эксп}}$ рассчитывалось в диапазоне 10 000... 26 000 об/мин. Использованы два способа оценки $\varepsilon_{\text{эксп}}$ отклонения ВХ:

- первый способ:

$$\varepsilon_{\text{эксп1}} = \frac{\left| \int_{n_1}^{n_2} N_d(n) dn - \int_{n_1}^{n_2} N_0(n) dn \right|}{0,5 \left[\int_{n_1}^{n_2} N_d(n) dn + \int_{n_1}^{n_2} N_0(n) dn \right]},$$

где N_0, N_d – интегральная абсолютная потребляемая мощность из ВХ, полученная в системе с базовым электродвигателем («0») и с дисбалансом («d»); n_1, n_2 – крайние значения частотного диапазона;

- второй способ:

$$\varepsilon_{\text{эксп2}} = \frac{\left| \int_{n_1}^{n_2} |N_d(n) - N_0(n)| dn \right|}{0,5 \int_{n_1}^{n_2} [N_d(n) + N_0(n)] dn}.$$

Графики относительного отклонения потребляемой мощности от среднего значения в эксперименте по двум способам приведены на рис. 4. Значения отклонений распределены по номерам винтов, расположенным в порядке возрастания потребляемой мощности.

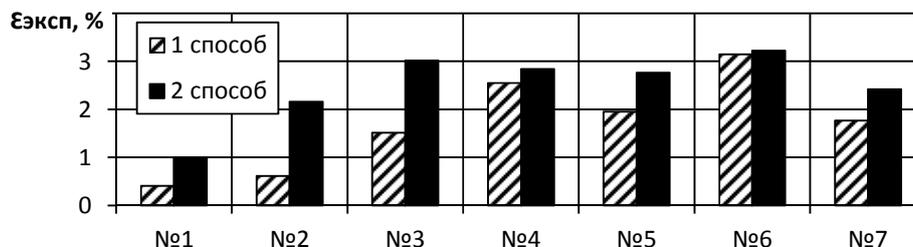


Рис. 4. Относительное отклонение потребляемой мощности от среднего значения в эксперименте

Базовый электродвигатель выбран по мощности близким исследуемому микроДВС. По отклонению ХХХ (рис. 4) электродвигателя с дисбалансом от характеристики на базовом электродвигателе (которое составило 19% при $n = 26\ 000$ об/мин) была рассчитана ВСХ микроДВС при условии, что на нём реализован дисбаланс с силой $F_{цб} = 33,8$ Н.

Оценка результатов экспериментальных исследований на разработанном стенде показала, что:

- среднее относительное отклонение потребляемой мощности от среднего значения в эксперименте по мощности составило $\varepsilon_{\text{эксп ср}} = 3\%$ в диапазоне 10 000...26 000 об/мин, а на максимальных оборотах вала 2,3%;

- использование стендового комплекса с электродвигателем возможно исключительно для получения ВХ, причём по опыту эксплуатации стенда ВХ незначительно зависят от износа подшипников электродвигателя;
- возможна оценка ВХ с точностью более 95%, стенд возможно использовать для тарировки винтов.

Расчёт внешней скоростной характеристики микроДВС

На основе методики, представленной в [2], рассчитана ВСХ анализируемого микроДВС с рабочим объёмом $2,5 \text{ см}^3$ (при параметрах $a = b = c = 1$) в двух вариантах:

- по номинальным параметрам ($n_{ном} = 27\,000$ об/мин, $N_{ном} = 736$ Вт) (рис. 5);
- по номинальным параметрам при влиянии дисбаланса ротора с силой $F_{цб} = 33,8$ Н.

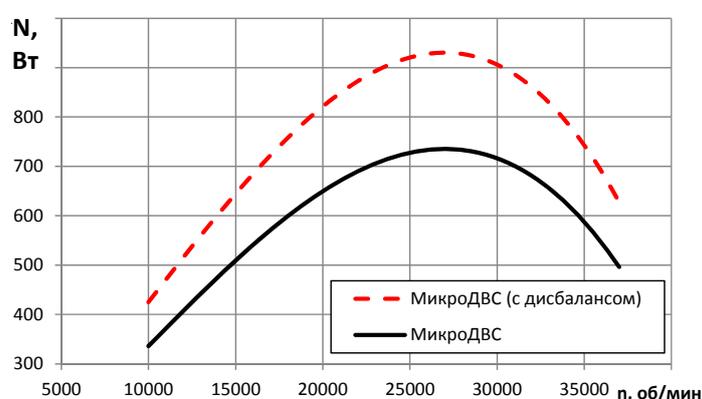


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика микроДВС с рабочим объёмом $2,5 \text{ см}^3$

Из графика ВСХ на рис. 5 можно видеть, что дисбаланс с силой 33,8 Н вызывает поглощение мощности на 195 Вт больше. Для сравнения: на ДВС объёмом $2,5 \text{ см}^3$ при 37 000 об/мин и радиусе до противовеса 7 мм каждый «неуравновешенный» грамм даёт увеличение силы дисбаланса на 105 Н.

Заключение

Адаптирован метод стендовых испытаний и разработан стендовый комплекс для высокооборотистых малоразмерных ДВС, удовлетворяющий следующим условиям:

- 1) комплекс позволяет отслеживать изменение «дисбалансной» мощности от 137 Вт (порядка 40% от мощности холостого хода), созданной центробежной силой 68,5 Н при 37 000 об/мин. Для микроДВС объёмом $2,5 \text{ см}^3$ при тех же оборотах и радиусе до противовеса 7 мм один неуравновешенный грамм даёт увеличение силы дисбаланса на 105 Н;
- 2) посредством выбора конструкции электродвигателя и использования бесконтактного способа измерения параметров мощности и частоты вращения вала устранён дисбаланс и обеспечена незначительная виброакустическая нагруженность измерительного комплекса;
- 3) обеспечена высокая повторяемость результатов измерений (относительное отклонение потребляемой мощности от значения на базовом электродвигателе в диапазоне 10 000... 26 000 об/мин не превысило 3%, а на 26 000 об/мин – 2,3%), зависимость погрешности эксперимента от потребляемой мощности винта отсутствует;

4) подвижная платформа с демпферными опорами позволяет проводить быструю перенастройку стенда при изменении конструкции ДВС;

5) увеличена надёжность и долговечность электродвигателя, максимальная частота вращения вала электродвигателя обеспечена до 37 000 об/мин;

6) разработанный стендовый комплекс позволяет для ОКБ предприятий самостоятельно определять внешние характеристики экспериментальных ДВС, оценивать влияние инновационных конструкторских решений.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-01560), <https://rscf.ru/project/22-29-01560/>.

Библиографический список

1. Калининченко В.Г. Применение микро двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в миниатюрных ЛА // Инженер-механик. 2012. № 4. С. 10-15.

2. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа, 1980. 400 с.

3. Ленин И.М., Попык К.Г., Малашкин О.М., Райков И.Я., Самоль Г.И., Сидорин К.И. Автомобильные и тракторные двигатели: Теория, системы питания, конструкция и расчёт. М.: Высшая школа, 1969. 656 с.

4. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. М.: Издательство стандартов, 1982. 42 с.

5. Лучанский И., Яновский А. Работа воздушного винта. М.: Изд-во ДОСААФ, 1954. 143 с.

6. Сидоров В.Н., Царёв О.А., Голубина С.А. Расчёт внешней скоростной характеристики двигателя внутреннего сгорания // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1, ч. 1.

7. Жидков С. Секреты высоких скоростей кордовых моделей самолётов. М.: Изд-во ДОСААФ, 1972. 142 с.

8. Гаевский О.К. Авиамодельные двигатели. Действие, конструкция, эксплуатация, форсирование. М.: Изд-во ДОСААФ, 1958. 256 с.

EXPERIMENTAL METHOD FOR EVALUATING THE BALANCE OF HIGH-SPEED SMALL-SIZED INTERNAL COMBUSTION ENGINES

© 2023

- | | |
|------------------------|---|
| P. D. Rekadze | Candidate of Science (Engineering), Specialist of the Institute of Engine and Power Plant Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
rekadze.pd@ssau.ru |
| S. Yu. Sychugov | Specialist of the Institute of Engine and Power Plant Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sychugov.sy@ssau.ru |
| V. S. Melentiev | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Construction and Design;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
kipdla223@ssau.ru |
| L. V. Rodionov | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
rodionov.lv@ssau.ru |

The article presents an adaptation of the Gaevsky-Zhidkov method for estimating the balance of high-speed small-sized internal combustion engines using the idle characteristic, as well as propeller and external speed characteristics. The main task was to develop a test bench that provides high accuracy, repeatability of measurements and the ability to test internal combustion engines with working volume of up to 3.5 cm³ at shaft speeds of up to 37,000 rpm. The test bench makes it possible to determine the characteristics of the “engine-propeller”, the no-load characteristic, and also to carry out quick reconfiguration of the test facility when changing the internal combustion engine structure. As a result of the experimental study, the propeller characteristics of seven propellers, the no-load characteristics for the base electric motor and an electric motor with imbalance were determined. Using these results, the external speed characteristics of an internal combustion micro-engine with working volume of 2.5 cm³ were compared for two levels of balancing.

Balance; internal combustion engine; test bench; non-contact method; external speed characteristic; propeller characteristic

Citation: Rekadze P.D., Sychugov S.Yu., Melentiev V.S., Rodionov L.V. Experimental method for evaluating the balance of high-speed small-sized internal combustion engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 3. P. 133-142. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-133-142

References

1. Kalinichenko V.G. Application of internal combustion micro-engines (ICE) in miniature aircraft. *Inzhener-Mekhanik*. 2012. No. 4. P. 10-15. (In Russ.)
2. Kolchin A.I., Demidov V.P. *Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley* [Calculation of automobile and tractor engines]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1980. 400 p.
3. Lenin I.M., Popyk K.G., Malashkin O.M., Raykov I.Ya., Samol' G.I., Sidorin K.I. *Avtomobil'nye i traktornye dvigateli: Teoriya, sistemy pitaniya, konstruktsiya i raschet* [Automobile and tractor engines: Theory, power systems, design and calculation]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1969. 656 p.
4. GOST 14846-81. Automobile engines. Methods of bench tests. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1982. 42 p. (In Russ.)
5. Luchanskiy I., Yanovskiy A. *Rabota vozdushnogo vinta* [Propeller operation]. Moscow: DOSAAF Publ., 1954. 142 p.
6. Sidorov V.N., Tsarev O.A., Golubina S.A. The calculation of the external speed characteristics of an internal combustion engine. *Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 1, part 1. (In Russ.)
7. Zhidkov S. *Sekrety vysokikh skorostey kordovykh modeley samoletov* [Secrets of high speeds of control line aircraft models]. Moscow: DOSAAF Publ., 1972. 142 p.
8. Gaevskiy O.K. *Aviamodel'nye dvigateli. Deystvie, konstruktsiya, ekspluatatsiya, forsirovanie* [Aircraft engines. Operation, design, maintenance, augmentation]. Moscow: DOSAAF Publ., 1958. 256 p.