

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОТУРБИННЫХ ПРИВОДОВ

© 2011 В. Н. Матвеев, Л. С. Шаблей

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье описаны конструкция и принцип действия экспериментального стенда для автоматизированного исследования малоразмерных турбинных приводов. Приведена методика проведения испытаний, обработки результатов автоматизированных измерений и оценки погрешностей эксперимента.

Стенд, привод микротурбинный, автоматизация эксперимента, обработка результатов испытаний, оценка погрешности.

В настоящее время для проведения экспериментальных исследований малоразмерных турбоприводов (МТП) используется широкий спектр установок, отличающихся принципом действия тормозного устройства. В работах [1] и [2] приведено описание большей части существующих установок: магнитно-воздушных, воздушно-вентиляторных, гидравлических, электрогенераторных, тормозных устройств с изменяемым масляным слоем и реверсивной турбиной. У каждой из этих установок своя область рабочих режимов, все они снабжены балансирными моментомерами и обладают определенными преимуществами и недостатками. Вместе с тем общим недостатком перечисленных установок является отсутствие автоматизации процесса испытаний, что обуславливает большую длительность и повышенную погрешность результатов эксперимента, исключает возможность исследования рабочего процесса МТП на переходных режимах.

В связи с этим была поставлена задача модернизации стенда для исследований МТП путём автоматизации управления проведением эксперимента; сбора, обработки и визуализации результатов испытаний.

Для модернизации был выбран стенд с магнитно-воздушной установкой. Этот стенд позволяет осуществлять экспериментальное определение моментных, мощностных, расходных и КПД-характеристик МТП в диапазонах мощности $N_{\text{ТП}}$ от 100

до 1000 Вт, крутящего момента $M_{\text{кр}}$ от 0,005 до 0,030 Н·м, расхода сжатого воздуха $G_{\text{в}}$ от 10 до 50 г/с при изменении степени понижения давления $\pi_{\text{ТП}}$ от 1,7 до 5,0 и частоты вращения – от 5000 до 50000 мин^{-1} . Стенд работает от пневмосети низкого давления (избыточное давление 500...700 кПа) и бытовой электросети (220 В, 50 Гц). Он экологически безопасен и допускает эксплуатацию в лабораторном помещении, занимая площадь не более 1 м² (габаритные размеры – 700×500×1200 мм, масса – 12 кг).

Магнитно-воздушная установка выбранного стенда позволяет осуществлять плавную регулировку тормозного момента на валу МТП за счёт изменения силы тока в цепи электромагнитов. Последнее удобно с точки зрения автоматизации: для изменения режимов работы МТП с помощью управляющих компьютерных программ не требуется установка на стенд дополнительных исполнительных устройств.

При модернизации стенда с магнитно-воздушной установкой решались следующие задачи:

- разработка алгоритма подготовки и проведения экспериментов в автоматическом режиме;
- автоматизация процессов сбора и обработки информации, визуализации результатов испытаний, управления экспериментом;
- разработка методики обработки результатов эксперимента, включая расчёт параметров МТП и их погрешностей, получение регрессионных моделей характеристик и их оценку на адекватность и статистическую значимость.

При разработке алгоритма подготовки и проведения эксперимента первоначально были проанализированы существующая схема измерений стенда и методика определения параметров МТП.

В процессе испытаний МТП замеряются следующие параметры (рис. 1):

- $p_{0 \text{ изб}}^*$, полное избыточное давление воздуха на входе в МТП, кПа;
- $p_2 \text{ изб}$, статическое избыточное давление на выходе из рабочего колеса, кПа;
- T_0^* , температура сжатого воздуха на входе в МТП, К;
- n , частота вращения вала, мин⁻¹;
- F , сила на конце рычага балансирующего моментомера, Н;
- G_B , расход сжатого воздуха, кг/с;
- p_H , атмосферное давление, кПа.

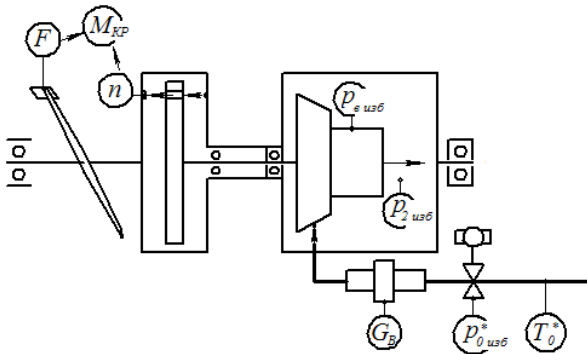


Рис. 1. Схема измерений стенда

Замеряемые величины позволяют определить следующие интегральные параметры МТП.

Крутящий момент на валу:

$$M_{кр} = F \cdot l, \quad (1)$$

где l – длина рычага балансирующего моментомера, м.

Абсолютные давления на входе и выходе из турбины:

$$p_{0}^* = p_{0 \text{ изб}}^* + p_H; \quad (2)$$

$$p_2 = p_2 \text{ изб} + p_H. \quad (3)$$

Степень понижения давления:

в МТП
$$\pi_{\text{МТП}} = \frac{p_0^*}{p_H} \quad (4)$$

и турбине
$$\pi_{\text{ТП}} = \frac{p_0^*}{p_2}. \quad (5)$$

Мощность:

$$N_{\text{ТП}} = \frac{\pi n M_{кр}}{30}. \quad (6)$$

Удельная механическая работа на валу турбины и МТП:

$$L_T = L_{\text{ТП}} = \frac{N_{\text{ТП}}}{G_B}. \quad (7)$$

Удельная изэнтропическая работа турбины и МТП:

$$L_{ST} = \frac{k}{k-1} RT_0^* \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \quad (8)$$

$$L_{S\text{ТП}} = \frac{k}{k-1} RT_0^* \left[1 - \left(\frac{p_H}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (9)$$

где $k=1,4$ – коэффициент изэнтропии;

$R = 287$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная.

Мощностной КПД:

турбины
$$\eta_T = \frac{L_T}{L_{ST}} \quad (10)$$

и МТП
$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{L_{\text{ТП}}}{L_{S\text{ТП}}}. \quad (11)$$

Окружная скорость на входе в рабочее колесо:

$$u_1 = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{D_1}{2}, \quad (12)$$

где D_1 – диаметр на входе в рабочее колесо, м.

Изэнтропическая скорость:

турбины
$$c_{ST} = \sqrt{2L_{ST}} \quad (13)$$

и МТП
$$c_{S\text{ТП}} = \sqrt{2L_{S\text{ТП}}}. \quad (14)$$

Параметр нагруженности:

турбины
$$Y_T = \frac{u_1}{c_{ST}} \quad (15)$$

и МТП
$$Y_{\text{ТП}} = \frac{u_1}{c_{S\text{ТП}}}. \quad (16)$$

С учетом рассмотренных схемы измерений и методики определения интегральных параметров был разработан алгоритм подготовки и проведения экспериментальных исследований в автоматизированном режиме, представленный на рис. 2. Он включает следующие основные этапы: подготовку стенда к работе, формирование в программном комплексе плана эксперимента, ввод значений постоянных параметров, проведение эксперимента, обработку результатов измерений.



Рис. 2. Алгоритм подготовки и проведения экспериментальных исследований в автоматизированном режиме

На этапе подготовки стенда к работе осуществляется монтаж исследуемого МТП в экспериментальной установке,

тестирование электрической и пневматической систем, а также всех каналов измерений.

На этапе формирования в программном комплексе плана эксперимента проводится выбор типа режима работы МТП между стационарным и переходным, устанавливаются границы проведения эксперимента по $\pi_{ТП}$ и $\Upsilon_{ТП}$. При этом сразу же автоматически по заданным значениям производится пересчёт границ испытаний на параметры $p_{0 изб}^*$ и n :

$$p_{0 изб}^* = p_H (\pi_{ТП} - 1); \quad (17)$$

$$n = \frac{60Y_{ТП}}{\pi D_1} \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_H \left[1 - \frac{1}{\pi_{ТП}^{\frac{k-1}{k}}} \right]}. \quad (18)$$

В последнем выражении температура T_0^* заменена на температуру окружающего воздуха T_H вследствие небольшой разницы в значениях этих параметров при проведении экспериментов в условиях СГАУ.

Далее на рассматриваемом этапе возможна установка шага изменения режимных параметров $\pi_{ТП}$ и $\Upsilon_{ТП}$, если при проведении эксперимента планируется автоматическая установка исследуемых режимов. При исследовании переходных режимов задаётся частота опроса измерительных каналов.

Затем осуществляется выбор определяемых характеристик. На стенде возможно получение моментной, расходной, мощностной и КПД-характеристик турбин и МТП. Причем их визуализация возможна в нормальном, универсальном и приведенном виде. На переходном режиме изменение параметров $M_{кр}$, $N_{ТП}$, G_B , η_t и $\eta_{ТП}$ представляется в зависимости от времени.

На следующем этапе производится ввод значений таких постоянных параметров, как средний диаметр на входе в рабочее колесо D_1 , длина рычага балансирующего моментомера l , коэффициент изоэнтропы k и удельная газовая постоянная R .

На этапе проведения эксперимента МТП и турбина исследуются либо на стационарных, либо переходных режимах.

В случае определения характеристик на стационарных режимах осуществляется перебор всех заданных вариантов параметров $\pi_{ТП}$ и $\Upsilon_{ТП}$ или $p_{0 изб}^*$ и n . При каждой фиксированной паре значений этих параметров производится наработка МТП до окончания переходных

процессов, после чего осуществляется запись информации по всем каналам измерений.

В случае определения характеристик на переходных режимах осуществляется установка исходных уровней режимных параметров $p_{0 \text{ изб}}^*$ и n и наработка МТП до окончания переходных процессов. После этого производится скачкообразное воздействие либо по каналу управления давлением на входе в МТП, либо по каналу управления тормозным моментом, либо по двум этим каналам сразу и с заданной частотой записывается информация по всем каналам измерения до тех пор, пока режим работы МТП не стабилизируется.

На этапе обработки результатов измерений производится автоматический расчёт параметров МТП и их погрешностей. По результатам расчёта определяются регрессионные модели характеристик, осуществляется их визуализация на экране дисплея и в твердых копиях. В дальнейшем проводится оценка регрессионных моделей характеристик на адекватность и статистическую значимость

Для осуществления работы по данному алгоритму стенд был снабжен систе-

мой автоматизации. Схема автоматизированного стенда представлена на рис. 3. На основании 1 расположены две стойки 2 с призмами 7 и корпус 15 турбины. На призмы 7 с помощью ножевых опор 8 установлен качающийся корпус тормозного барабана 3. На нем закреплен рычаг 10, который опирается на площадку тензометрического датчика силы 11. В корпусе на шарикоподшипниках размещается турбинный вал 6. На правом конце вала (см. рис. 3) располагается рабочее колесо 17, а сопловой аппарат 16 жестко установлен в неподвижном корпусе 15. На левом конце вала смонтирован тормозной диск 5 с вентиляторными лопатками 4. Периферийная часть диска размещена в зазоре разрезных сердечников четырёх электромагнитов 18, установленных на тормозном барабане 3. В диске выполнены два симметричных отверстия для регистрации частоты вращения вала турбины фотоэлектрическим датчиком 9.

Работает стенд следующим образом. Сжатый воздух подается из сети в экспериментальную установку через фильтр 12. Заданное избыточное давление поддерживается автоматическим краном-регулятором 13. Далее рабочее тело через расходомер 14 подается в МТП, где совершает работу по вращению рабочего колеса.

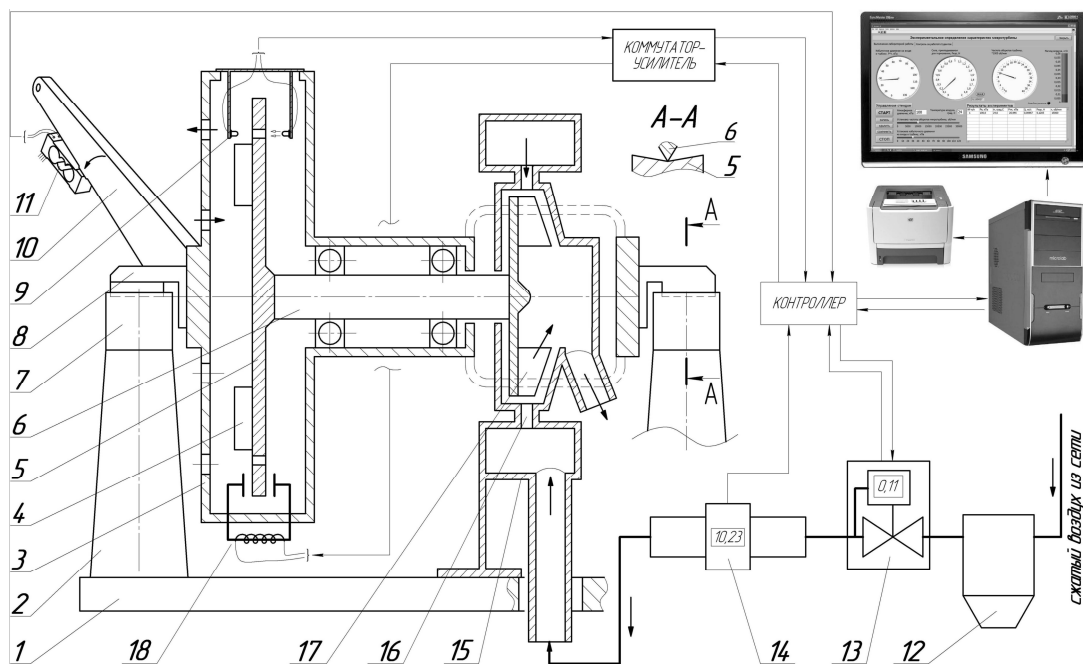


Рис. 3. Автоматизированный стенд для получения экспериментальных характеристик ЦСМТП

Регулирование частоты вращения вала тока в цепи электромагнитов. Последнее выполняется изменением момента торможения [1] с помощью регулирования силы

программе испытаний МТП. Отработавший воздух выбрасывается в атмосферу.

Для замера параметров, приведенных на схеме измерений (см. рис. 1), были первоначально использованы следующие датчики. Для $p_{0 \text{ изб}}$ - система индикации выходного давления электропневматического преобразователя ITV3050-01F4N-Q (производство SMC Corporation, Япония). Для измерения p_H применялся электронный цифровой датчик давления АИР-10 (производство НПП «Элемер», РФ). Температура воздуха на входе в турбину T_0^* была принята равной температуре воздуха в лаборатории T_H и определялась с помощью лабораторного термометра. Массовый расход воздуха G_B определялся, исходя из объемного Q_B , который измерялся датчиком объемного расхода воздуха с цифровой индикацией SMC F2A703H-F10-69:

$$G_B = Q_B \frac{p_0^*}{RT_0^*} = Q_B \frac{p_{0 \text{ изб}}^* + p_H}{R(t_0^* + 273)} \quad (19)$$

Сила F , которую развивает ЦСМТП на коромысле тормозного барабана, регистрировалась тензометрическим датчиком силы L6J1-C3D-0.3kg-0.45В (производство Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co.Ltd (ZEMIC), КНР). Давление в выходном патрубке $p_2 \text{ изб}$ измерялось датчиками давлени-

ния или вакуума PSE-533-M5-L (производство SMC Corporation, Япония). Частота вращения вала МТП определялась с помощью фотоэлектрического датчика, регистрирующего обороты вала N за время t .

Сигналы со всех датчиков обрабатываются автоматизированной системой стенда и отображаются на дисплее в виде измеряемых величин (рис. 4), а также используются для распечатки протокола испытаний и автоматического расчёта характеристик.

Система автоматизации представляет собой совокупность датчиков, исполнительных устройств и системы сбора и обработки информации в виде компьютерной системы (рис. 5).

Компьютерная система состоит из компьютера типа IBM, к которому по сети (LAN) подключен контроллер, представляющий собой набор цифроаналоговых, аналого-цифровых преобразователей (ЦАП-АЦП) и других специальных устройств. Контроллер является связующим звеном между датчиком и компьютером. Вся система функционирует под управлением специального программного обеспечения Lab-View, позволяющего получать и передавать информацию через контроллер.



Рис. 4. Вид дисплея экспериментальной установки:

- 1 - индикатор избыточного давления на входе в турбину $p_{0 \text{ изб}}^*$; 2 - индикатор силы торможения F ;
- 3 - индикатор частоты вращения вала МТП n ; 4 - индикатор массового расхода воздуха G_B ; 5 - поле задания атмосферного давления p_H ; 6 - поле задания температуры t_0^* ; 7 - таблица результатов эксперимента;
- 8 - ползунок регулировки частоты вращения вала МТП;
- 9 - ползунок избыточного давления на входе в турбину $p_{0 \text{ изб}}^*$

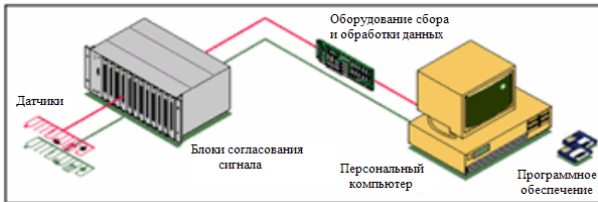


Рис. 5. Схема системы автоматизации стенда

Управляющие сигналы идут в направлении, обратном информационным. Согласно плану эксперимента (или под воздействием оператора на элементы управления программы) программный комплекс LabView формирует управляющие цифровые сигналы, которые поступают в блок контроллера. ЦАП по установленному на входе цифровому сигналу формирует на выходе аналоговый сигнал напряжения или тока соответствующей интенсивности. Этот аналоговый сигнал принимается исполнительными устройствами - входным вентилем воздушной магистрали и тормозными электромагнитами. В последнем случае используется усилитель, поскольку электротормоз требует значительно большую мощность, чем имеется на выходе ЦАП.

Результат управляющего воздействия (включение/отключение подачи воздуха, изменение расхода, тормозного усилия) фиксируется ранее описанной системой сбора и обработки информации. Так осуществляется обратная связь, необходимая для автоматического регулирования процесса эксперимента. Алгоритм автоматического регулирования, оценивая рассогласование по заданному и измеренному значениям параметра (например, частоты вращения), создаёт управляющее воздействие, которое устраняет вызвавшее его рассогласование.

Например, при снятии характеристики $\eta_{ТП} = f(y_{ТП})$ необходимо установить частоту вращения РК на требуемом уровне. Оператор выбирает требуемое значение, передвигая ползунок δ (см. рис. 4). После этого вступает в работу система автоматизации. Она оценивает текущее значение частоты вращения и сравнивает его с заданным. Например, если частота вращения выше требуемой, то система выдаёт сигнал на повышение тока в тормозных магнитах. Повышение тормозного усилия

приводит к снижению частоты вращения. Система оценивает новое значение частоты вращения и в случае её отклонения от заданной опять регулирует тормозной момент.

Таким образом проводятся испытания в автоматизированном режиме и формируется база данных с первичными результатами эксперимента. В дальнейшем по описанной выше методике производится определение таких интегральных параметров, как $M_{КР}$, $N_{ТП}$, $L_{ТП}$, η_T и $\eta_{ТП}$ при фиксированных режимных параметрах $\pi_{ТП}$ и $Y_{ТП}$ или π_T и Y_T .

Для расчёта предельных относительных погрешностей, определяемых в процессе эксперимента параметров, была разработана методика, базирующаяся на рекомендациях [3]. С учетом случайной и систематических составляющих формулы для определения основных интегральных и режимных параметров имеют следующий вид:

$$\delta G_B = k\sqrt{\delta^2 Q_B + B^2 \delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + C^2 \delta^2 p_H + H^2 \delta^2 t_0^*}; \quad (20)$$

$$\delta M_{КР} = k\sqrt{\delta^2 F + \delta^2 I}; \quad (21)$$

$$\delta N_{ТП} = k\sqrt{\delta^2 N + \delta^2 F + \delta^2 I + \delta^2 \tau}; \quad (22)$$

$$\delta \eta_{ТП} = k\sqrt{\delta^2 N + \delta^2 F + \delta^2 I + \delta^2 \tau + \delta^2 Q_B + (A-B)^2 \delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + (A+C)^2 \delta^2 p_H}; \quad (23)$$

$$\delta \eta_T = k\sqrt{\delta^2 N + \delta^2 F + \delta^2 I + \delta^2 \tau + \delta^2 Q_B + \left(\frac{BD}{C} - B\right)^2 \delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + \left(I \frac{C-D}{CD^3} + C\right)^2 \delta^2 p_H + \left(\frac{ID}{CE^3}\right)^2 \delta^2 p_{2\text{ изб}}^*}; \quad (24)$$

$$\delta \pi_{ТП} = kB\sqrt{\delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + \delta^2 p_H}; \quad (25)$$

$$\delta \pi_T = k\sqrt{B^2 \delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + (C-D)^2 \delta^2 p_H + E^2 \delta^2 p_{2\text{ изб}}^*}; \quad (26)$$

$$\delta Y_{ТП} = k\sqrt{\delta^2 N + \delta^2 D_1 + \delta^2 \tau + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \delta^2 t_0^* + \left(\frac{A}{2}\right)^2 (\delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + \delta^2 dp_H)}; \quad (27)$$

$$\delta Y_T = k\sqrt{\delta^2 N + \delta^2 D_1 + \delta^2 \tau + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \delta^2 t_0^* + \left(\frac{BD}{2C}\right)^2 \delta^2 p_{0\text{ изб}}^* + \left(I \frac{C-D}{2CD^3}\right)^2 \delta^2 p_H + \left(\frac{ID}{2CE^3}\right)^2 \delta^2 p_{2\text{ изб}}^*}, \quad (28)$$

$$\text{где } B = \frac{p_{0\text{ изб}}^*}{p_{0\text{ изб}}^* + p_H}; \quad C = \frac{p_H}{p_{0\text{ изб}}^* + p_H}; \quad D = \frac{p_H}{p_{2\text{ изб}}^* + p_H};$$

$$E = \frac{p_{2\text{ изб}}^*}{p_{2\text{ изб}}^* + p_H}; \quad H = \frac{t_0^*}{t_0^* + 273};$$

$$A = \frac{k-1}{C^{\frac{k-1}{k}} - 1} C^{\frac{k-1}{k}} B; \quad I = \frac{k-1}{\left(\frac{C}{D}\right)^{\frac{2k-1}{k}} - 1} \left(\frac{C}{D}\right)^{\frac{2k-1}{k}}.$$

Погрешность определения того или иного параметра, определенного на автома-

тизированном стенде, складывается из погрешности датчика-преобразователя физической величины в электрическую и погрешности преобразования аналогового электрического сигнала в цифровой. Погрешность аналого-цифрового преобразования сигнала, в свою очередь, также складывается из двух погрешностей: погрешности неточности преобразования сигнала (нелинейность АЦП) и погрешности квантования сигнала.

Например, полное избыточное давление воздуха $p_{0 \text{ изб}}^*$ на входе в испытываемую турбину измеряется индикаторной частью так называемого электропневматического преобразователя ITV3050-01F4N-Q (производство SMC Corporation, Япония) с точностью $\pm 3\%$ от полного диапазона, который для ITV3050-01F4N-Q составляет 0,9 МПа. Таким образом, измеренное с абсолютной точностью ± 27 кПа значение давления $p_{0 \text{ изб}}^*$ из диапазона 0,05...0,9 МПа преобразуется в сигнал напряжения в диапазоне 1...5 В с коэффициентом преобразования

$$k = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} = \frac{900 - 5}{5 - 1} = 223,75 \text{ кПа/В.}$$

Далее этот сигнал преобразуется в цифровой с погрешностью нелинейности и квантования. Применяемый АЦП FR-AI-112 производит оцифровку напряжения из диапазона 0...5 В с точностью $\pm 0,05\%$ и выдаёт 16-битный сигнал. Таким образом, абсолютная погрешность измерения напряжения складывается из абсолютной погрешности нелинейности:

$$\Delta_{н/л} = \frac{\delta_{н/л}}{100\%} \cdot U_{\max}^{\text{АЦП}} = \frac{0,05}{100\%} \cdot 5 = \pm 2,5 \text{ мВ}$$

и погрешности квантования:

$$\begin{aligned} \Delta_{кв} &= \frac{\delta_{кв}}{100\%} (U_{\max}^{\text{АЦП}} - U_{\min}^{\text{АЦП}}) = \\ &= \frac{0,0008\%}{100\%} (5 - 0) = \pm 0,04 \text{ мВ,} \end{aligned}$$

где $\delta_{кв}$ - относительная погрешность квантования, $\delta_{кв} = \frac{100\%}{2 \cdot 2^n} = \frac{100\%}{2 \cdot 2^{16}} = 0,0008\%$.

Следовательно, абсолютная погрешность измерения напряжения составляет $\pm 2,54$ мВ.

Поскольку преобразователь линейный, то физическая величина и соответствующее ей напряжение связаны линейным соотношением:

$$p = k(u - u_{\min}) + p_{\min},$$

где k - коэффициент преобразования.

Напряжению же, измеренному с некоторой погрешностью, соответствует значение давления со своей погрешностью:

$$\begin{aligned} p(u \pm \Delta u) &= k(u \pm \Delta u - u_{\min}) + p_{\min} = \\ &= p(u) \pm k\Delta u = p(u) \pm \Delta p \end{aligned}$$

или

$$\Delta p = k\Delta u.$$

Таким образом, погрешность измерения напряжения $\Delta u = \pm 2,54$ мВ соответствует погрешности измерения давления $\Delta p = k \cdot \Delta u = 223,75 \cdot \pm 0,00254 = \pm 0,57$ кПа. Поэтому, чтобы получить полную абсолютную погрешность определения полного избыточного давления, нужно к абсолютной погрешности измерения сигнала датчиком прибавить абсолютную погрешность его оцифровки:

$$\Delta p_{0 \text{ изб}}^* = \pm 27 \text{ кПа} + \pm 0,57 \text{ кПа} = \pm 27,57 \text{ кПа.}$$

Аналогично определяются абсолютные погрешности измерения всех остальных величин. При этом надо отметить, что погрешность преобразования аналогового сигнала в цифровой существенно меньше (на один-два порядка) погрешности датчика-преобразователя физического параметра в электрический параметр.

Разработанная методика расчёта погрешностей была использована для оценки точности измерений параметров МТП на модернизированном стенде. При этом оказалось, что при $\pi_{\text{ТП}} = 5$ и $n = 50000 \text{ мин}^{-1}$ погрешности определения $\eta_{\text{ТП}}$, $\pi_{\text{ТП}}$ и $Y_{\text{ТП}}$ составили соответственно 61%, 18% и 13%, что, естественно, не соответствует требованиям к точности эксперимента.

Поэтому был проведен анализ источников повышенной погрешности. Ими оказались приборы измерения полного давления и объёмного расхода воздуха. Погрешности измерений $p_{0 \text{ изб}}^*$ и Q_V превышали остальные в 5-10 раз. В связи с этим было решено заменить приборы измерения соответствующих величин на более точные: для Q_V применить расходомер с большей точностью и меньшим диапазоном измерений PF2A551 (SMC Corporation), а для $p_{0 \text{ изб}}^*$ - более точный датчик

PSE540A (SMC Corporation). Поскольку при этом клапан, устанавливающий давление $p_{0 \text{ изб}}$, и датчик, контролирующий давление, разделены, было решено перенести точку измерения $p_{0 \text{ изб}}$ от клапана непосредственно ко входу в МТП, несколько изменив схему измерений (рис. 6). Это позволило избежать систематической погрешности, связанной с понижением полного давления воздуха при прохождении им расходомера, которое согласно паспорту расходомера может достигать 30 кПа при расходе 350 л/мин.

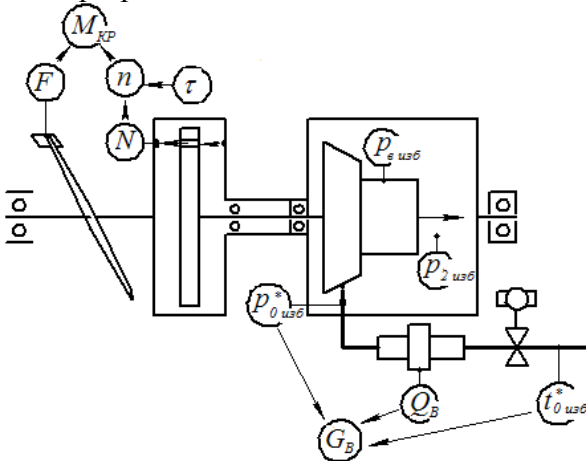


Рис. 6. Схема измерений автоматизированного стенда

С использованием новой схемы измерений максимальная погрешность определения КПД при доверительной вероятности $P=0,99$ не превышает 3,1% на режимах от $\pi_{\text{ТП}}=3$ до $\pi_{\text{ТП}}=6$ и не более 4,2% на режиме $\pi_{\text{ТП}}=2$. При этом погрешность определения $\eta_{\text{ТП}}$ не превышает 1,4%, а $\pi_{\text{ТП}}$ - 1,7% на всех режимах работы. Если стенд с данной системой измерений использовать для инженерных исследований, то на всех режимах работы с доверительной вероятностью 0,95 погрешности не будут превышать: по $\eta_{\text{ТП}}$ - 3,3%, по $Y_{\text{ТП}}$ - 1,1%, по $\pi_{\text{ТП}}$ - 1,4%.

Для построения регрессионных моделей характеристик МТП таких, например, как $M_{\text{кр}}=f(Y_{\text{ТП}})$, $N_{\text{ТП}}=f(Y_{\text{ТП}})$, $\eta_{\text{ТП}}=f(Y_{\text{ТП}})$ при $\pi_{\text{ТП}}=\text{var}$; $G_{\text{в}}=f(\pi_{\text{ТП}})$ при $Y_{\text{ТП}}=\text{var}$ и оценки этих характеристик на адекватность и статистическую значимость разработана методика с использованием рекомендаций монографии [4].

Известно, в частности, что регрессионная модель зависимости $M_{\text{кр}}=f(Y_{\text{ТП}})$

представляет собой прямую линию, а характеристика $\eta_{\text{ТП}}=f(Y_{\text{ТП}})$ - ветвь параболы. С учетом этой информации моментная характеристика в общем случае описывается выражением $M_{\text{кр}}=a+bY_{\text{ТП}}$, а КПД-характеристики - $\eta_{\text{ТП}}=a+bY_{\text{ТП}}+cY_{\text{ТП}}^2$. Коэффициенты регрессионных зависимостей определяются с помощью метода наименьших квадратов по экспериментальным точкам.

Далее производится проверка регрессионных моделей, полученных таким образом, на адекватность экспериментальным данным и статистическую значимость следующим образом.

По формуле

$$MS_{L \text{ расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_{\text{ТП} p} (Y_{\text{ТП}})_i - \eta_{\text{ТП} p i})^2}{m-3}, \quad (29)$$

где m - число уровней (значений $Y_{\text{ТП}}$), вычисляется средний квадрат ошибок, обусловленных неадекватностью квадратичной математической модели для квадратичных моделей (например, $\eta_{\text{ТП}}=f(Y_{\text{ТП}})$, $N_{\text{ТП}}=f(Y_{\text{ТП}})$). Ему соответствует число степеней свободы ($m-3$), так как три степени свободы использованы для определения коэффициентов регрессии.

Для $M_{\text{кр}}=f(Y_{\text{ТП}})$ используется формула

$$MS_{L \text{ расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_{\text{ТП} p} (Y_{\text{ТП}})_i - \eta_{\text{ТП} p i})^2}{m-2} \quad (30)$$

со степенью свободы ($m-2$), так как две степени свободы использованы для определения линейной математической модели.

По формуле

$$MS_e = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_{\text{ТП} \varepsilon i} \cdot \frac{1}{3} \delta \eta_{\text{ТП} \varepsilon i})^2}{m} \quad (31)$$

вычисляется средний квадрат ошибок, обусловленных погрешностью эксперимента. Ему соответствует бесконечное число степеней свободы.

Затем по формуле

$$MS_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_{\text{ТП} p} (Y_{\text{ТП}})_i - \eta_{\text{ТП} \varepsilon i})^2}{m} \quad (32)$$

вычисляется средний квадрат ошибок, вызванных отличием расчётной КПД-характеристики от экспериментальной. Ему соответствует m степеней свободы.

По формуле

$$MS_R = \sum_{i=1}^m (\eta_{ТП\ p} (Y_{ТП})_i - \overline{\eta_{ТП\ p}} (Y_{ТП}))^2, \quad (33)$$

где $\overline{\eta_{ТП\ p}} (Y_{ТП}) = \left(\sum_{i=1}^m \eta_{ТП\ p} (Y_{ТП})_i \right) / m$,

определяется сумма квадратов отклонения всех значений КПД, рассчитанных по регрессионной модели, от их среднего значения. Ей соответствует одна степень свободы.

Далее вычисляются критерии, характеризующие адекватность и статистическую значимость полученных характеристик. Адекватность регрессионной модели экспериментальным данным характеризуется отношением среднего квадрата ошибок $MS_{расч}$, умноженного на число уровней (значений $Y_{ТП}$), к сумме средних квадратов ошибок регрессионной модели и эксперимента, также умноженных на соответствующее им число уровней. Для квадратичных зависимостей

$$F = \frac{MS_{расч} m}{MS_e m + MS_{L\ расч} (m-3)}, \quad (34)$$

для линейной характеристики

$$F = \frac{MS_{расч} m}{MS_e m + MS_{L\ расч} (m-2)}. \quad (35)$$

Если расчетное значение F-критерия окажется меньше табличного для соответствующего отношения числа степеней свободы m/∞ , то ошибки, обусловленные разницей экспериментальных значений КПД и значений КПД, полученных по регрессионной модели, не превышают суммы ошибок регрессионной модели и эксперимента. В этом случае регрессионная модель признаётся адекватной. В противном случае может быть проведен анализ части регрессионной зависимости, с меньшим числом уровней. Результатом такого анализа является утверждение об адекватности регрессионной зависимости в некотором диапазоне аргумента.

Далее адекватная регрессионная модель может быть проверена на статистическую значимость с помощью критерия, равного отношению суммы квадратов MS_R к сумме средних квадратов всех ошибок,

умноженных на соответствующее число уровней. Для квадратичных зависимостей

$$F = \frac{MS_R}{MS_{L\ расч} (m-3) + MS_e m + MS_{расч} m}, \quad (36)$$

для линейной характеристики:

$$F = \frac{MS_R}{MS_{L\ расч} (m-2) + MS_e m + MS_{расч} m}. \quad (37)$$

Если расчетное значение F-критерия окажется больше табличного значения для отношения числа степеней свободы $1/\infty$, то величина изменения функции в рассматриваемом диапазоне значительно превосходит сумму всех погрешностей. В этом случае регрессионная модель является статистически значимой.

Таким образом, при модернизации стенда для исследования МТП был разработан алгоритм подготовки и проведения экспериментов в автоматизированном режиме; осуществлена автоматизация процессов сбора и обработки информации, визуализации результатов испытаний, управления экспериментом; разработана методика расчёта погрешностей, определяемых при испытаниях параметров, и построения регрессионных моделей характеристик МТП с их оценкой на адекватность и статистическую значимость. В области рабочих режимов модернизированного стенда предельные относительные погрешности не превышают по КПД - 3,3%, по $Y_{ТП}$ - 1,1% и по $\pi_{ТП}$ - 1,4% при доверительной вероятности 95%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Тихонов, Н.Т. Опыт создания и основные принципы проектирования установок для экспериментального исследования микротурбин [Текст] / Н.Т. Тихонов // Испытания авиационных двигателей. – Уфа: УАИ, 1987. - №15 – С. 13-21.
2. Матвеев, В.Н. Методика выбора типа тормозной установки для испытания микротурбин [Текст] / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // Актуальные проблемы производства. Технология, орга-

низация, управление. – Самара: СГАУ, 1995. – С. 27-33.

3. Рекомендация МИ 2083-90 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей» / Комитет

стандартизации и метрологии СССР. – М.: 1991.

4. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст]: в 2 кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 336 с.

MODERNIZATION OF TEST-BENCH FOR SMALL TURBINE-DRIVES INVESTIGATION

© 2011 V. N. Matveev, L. S. Shabliy

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev
(National Research University)

Construction and operating principle of test-bench for automate investigation of small turbine drives are described in paper. Methodologies of test operation, analysis of automate measurements and error estimate is given.

Test-bench, small turbine-drive, experiment automation, analysis of tests, error estimate.

Информация об авторах

Матвеев Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-94, E-mail: tdla@ssau.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, численные методы расчёта.

Шаблий Леонид Сергеевич, инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-94. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, их выходные устройства, численные методы расчёта, гидрогазодинамика, программирование.

Matveev Valeriy Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department of aircraft engines theory, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). Phone: (846) 267-45-94. E-mail: tdla@ssau.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, numerical calculations.

Shabliy Leonid Sergeevich, Engineer of aircraft engines theory department, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). Phone: (846) 267-45-94. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, turbo-machines nozzles, hydro-gas-dynamic, numerical calculations, programming.