

УДК 621.833.6

DOI 10.22213/2413-1172-2017-4-26-30

М. Н. Каракулов, доктор технических наук, доцент, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

М. Г. Исупов, доктор технических наук, доцент, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. С. Мельников, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

А. А. Жаркова, студентка, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ ПЛУНЖЕРНЫХ ПЕРЕДАЧ С ГАЗОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЛНООБРАЗОВАТЕЛЕМ

Одной из областей применения плунжерных передач с газомеханическим волнообразователем является использование их в качестве силового привода систем автоматизированного управления (САУ) арматурой газонефтепроводов, поэтому к нему предъявляются определенные требования по

кинематической точности передачи движения от вала золотника-распределителя к выходному валу. Основной частью таких приводов являются плунжерные газогидравлические двигатели (ПГД).

Схема стенда представлена на рис. 1, фотографии экспериментальной установки – на рис. 2.

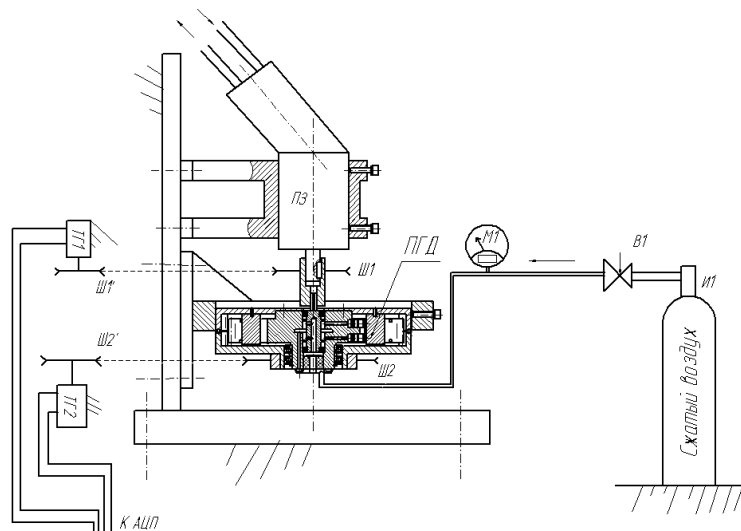


Рис. 1. Схема стенда для определения передаточного отношения

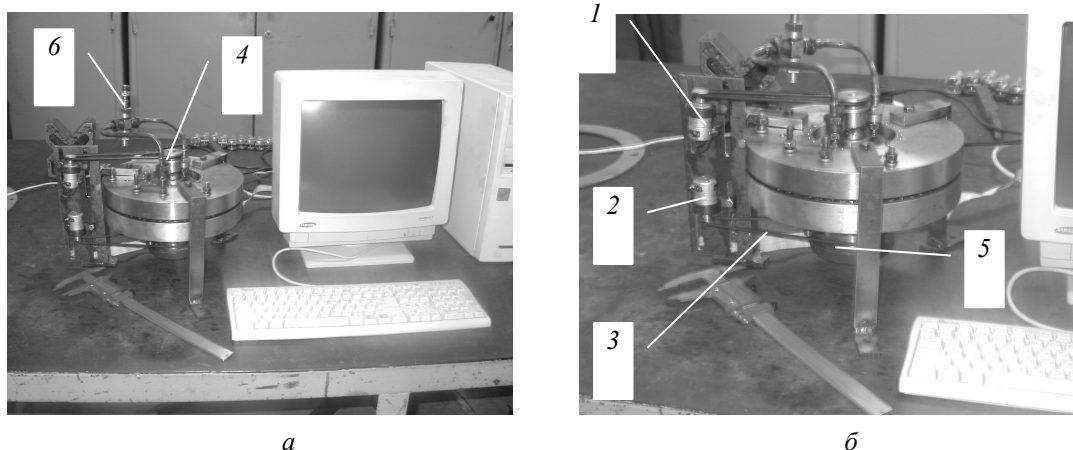


Рис. 2. Стенд для определения кинематической погрешности: а – общий вид установки; б – расположение тахогенераторов (1, 2 – тахогенераторы ТГП-3А; 3 – ремень; 4, 5 – шкивы; 6 – штуцер подачи рабочего тела)

Для компенсации неравномерности вращения выходного вала ПГД, вызванной различием окружных сил в зацеплении, эксперимент проводился для вертикального случая расположения привода (см. рис. 1).

Для проведения эксперимента стенд укомплектовывался двумя тахогенераторами ТГ1 и ТГ2 типа ТПП-3А (см. рис. 2) с линейной характеристикой выходного сигнала, которые с помощью ременной передачи соединялись со шкивами Ш1 и Ш2, установленными, соответственно, на валу золотника и выходном валу ПГД. Тахогенераторы генерировали постоянный электрический ток, который поступал непосредственно на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), так как в этом случае уровень напряжения, выработанного тахогенераторами, позволяет подключить их напрямую к регистрирующей аппаратуре.

В связи с тем, что в данном эксперименте не ставилась задача определения явных частот вращения золотника и зубчатого колеса, тахогенераторы не подвергались предварительному тарированию.

Так как целью эксперимента является определение собственной кинематической погрешности плунжерной передачи ПГД (вне зависимости ее от нагрузки на привод), эксперимент производился без приложения нагрузочного крутящего момента к валу зубчатого колеса при параметрах рабочего тела $p = 4,0$ МПа (40 атм.) и $p_0 = 0,1$ МПа (1,0 атм.).

При отсутствии крутящего момента на выходном валу ПГД энергии сжатого воздуха достаточно для приведения во вращение золотника генератора. Это объясняется технологической неточностью изготовления растров высокого давления, которая при противофазном приложении давления позволяет получить крутящий момент. Этот эффект в целях упрощения установки использовался при проведении эксперимента, т. е. привод золотника осуществлялся без установки стороннего источника движения. Как показали дальнейшие испытания, данный эффект пропадает при приложении к выходному валу нагрузки в виде крутящего момента, составляющего 20-30 % от номинального. Отказ от установки привода золотника приводит к неравномерности вращения вала золотника, но так как при проведении эксперимента регистрировалась частота вращения и входного, и выходного вала ПГД, то данное введение не отразится на результатах определения передаточного отношения.

Регистрация напряжений на тахогенераторах производилась при установившемся режиме работы золотника и продолжалась на протяжении одного оборота вала зубчатого колеса, что составило среднее (по 3 опытам) время 29,8 сек. Серия экспериментов состояла из 3 испытаний, данные о которых регистрировались в отдельные файлы. Чтобы уменьшить влияние температуры нагрева тахогенераторов при работе на данные, повторные снятия характеристик производились не менее чем через 1 час после остановки ПГД. Программа, реализующая инициализацию АЦП и управляющая записью данных на магнитный носитель, реализована в среде BORLAND PASCAL 7.0.

В результате эксперимента были получены следующие графики частот вращения входного и выходного валов, которые в виде кинематограмм для экспериментального образца ПГД-1 представлены на рис. 3. На рис. 4 представлена зависимость $i_{зк}^C(t)$ для исследуемой передачи ПГД-1.

Для проверки достоверности результатов эксперимента использовалась следующая последовательность действий.

1. По данным серии опытов производилось совмещение полученных результатов по ближайшему минимальному значению $i_{зк}^C(N)$ с приведением их к общей шкале N .

2. Затем производилось отсеивание аномальных результатов по t -критерию Стьюдента [1] при 5%-м уровне значимости для однофакторного эксперимента согласно условию

$$t = \left(i_{зк}^C(N) - i_{зк}^C(N)_{cp} \right) / \sigma(N) < t_{табл}(n) = 4,3, (1)$$

где $n = 3$ – количество опытов при одинаковом значении N в серии;

$\sigma(N) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(i_{зк}^C(N)_i - i_{зк}^C(N)_{cp} \right)^2 / n}$ – стандартное отклонение.

3. Определялся среднеарифметический период повторений цикла изменения передаточного отношения с целью выявления продолжительности цикла и полуцикла, методика которого описана ниже.

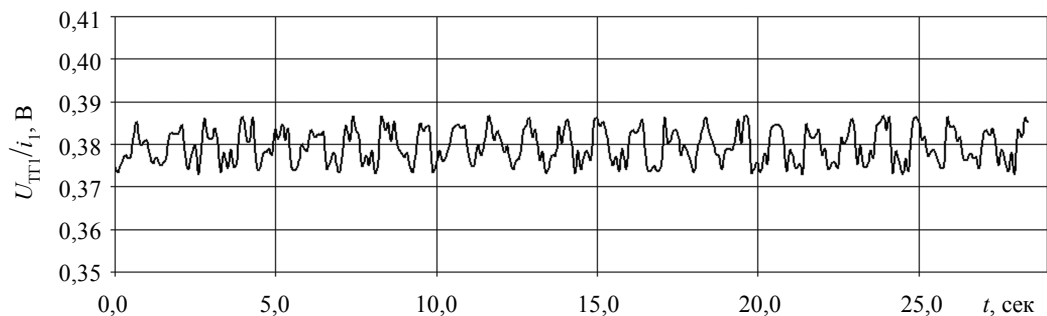
4. После чего были выделены два интервала: $N \in [0, 13750]$ и $N \in [6250, 13750]$, которые соответствуют циклу и полуциклу изменения передаточного отношения плунжерной передачи.

Результаты анализа полуцикла показывают, что коэффициент детерминации на рассматри-

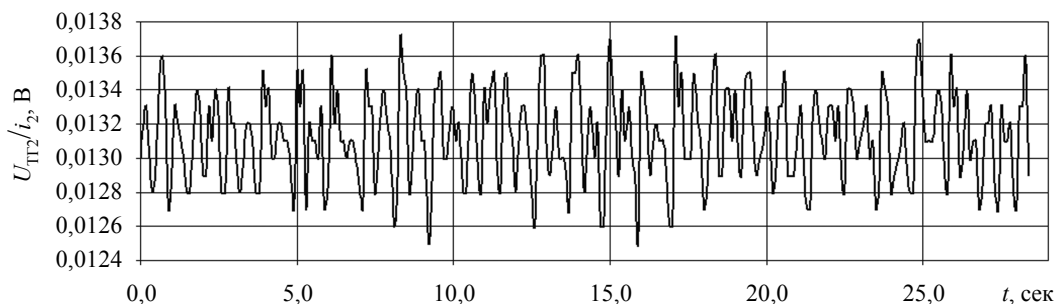
ваемом участке $R^2 = 0,4307$, коэффициент корреляции $R = 0,6562$. Для оценки относительной погрешности эксперимента рассматриваемого участка был определен коэффициент осцилляции $K_R = 0,0444$, среднеарифметическое значение которого определялось из зависимости

$$K_R = \left(\frac{i_{3K_{\max}}^C - i_{3K_{\min}}^C}{i_{3K_{\text{cp}}}^C} \right) / N_n, \quad (2)$$

где $N_n = 6$ – количество рассматриваемых точек записи в интервале $N \in [6250, 13750]$.



а



б

Рис. 3. Кинематограмма передачи ПГД-1 при $T_{\text{кр}} = 0$; $p_0 = 0,1$ МПа; $p = 4,0$ МПа:

а – $U_{\text{ПГ1}}(t)/i_1$; б – $U_{\text{ПГ2}}(t)/i_2$

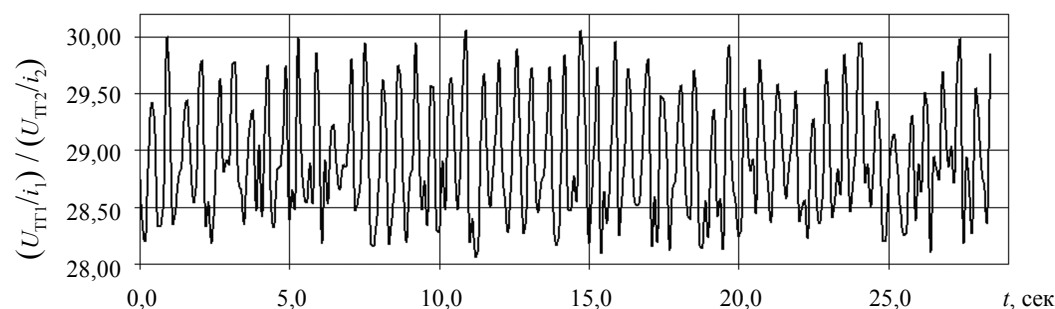


Рис. 4. Передаточное отношение между золотником и зубчатым колесом для ПГД-1 при $T_{\text{кр}} = 0$; $p_0 = 0,1$ МПа; $p = 4,0$ МПа

Анализ достоверности данных при рассмотрении участка $N \in [0, 325000]$ показывает, что дисперсия на указанном участке составляет $\sigma^2 = 0,3223$, а среднее значение критерия Стьюдента при исключенных аномальных ре-

зультатах $t_{\text{cp}} = 0,903$ при нормированном $t_{\text{таб}}(3) = 4,3$, что говорит об удовлетворительной достоверности результатов и целесообразности проведения дальнейшего анализа.

Для получения передаточного отношения по результатам регистрации напряжений на тахогенераторах ТГ1 и ТГ2 использовались следующие зависимости:

$$i_{\text{зк}}^C(N) = \frac{i_2 U_{\text{ТГ1}}(N)}{i_1 U_{\text{ТГ2}}(N)}, \quad (3)$$

где N – общее количество записей, произведенных в файл данных за произвольный интервал времени; $i_1 = (D_{\text{Ш1}} + d)/(D_{\text{Ш1}'} + d)$ – передаточное отношение между шкивами ременной передачи ТГ1, где $D_{\text{Ш1}'}$ и $D_{\text{Ш1}}$ – диаметры ременных шкивов, установленных на вал тахогенератора ТГ1 и золотника соответственно; $i_2 = (D_{\text{Ш2}} + d)/(D_{\text{Ш2}'} + d)$ – передаточное отношение между шкивами ременной передачи ТГ2, где $D_{\text{Ш2}'}$ и $D_{\text{Ш2}}$ – диаметры ременных шкивов, установленных на вал тахогенератора ТГ2 и зубчатого колеса соответственно; d – диаметр ремней; $U_{\text{ТГ2}}(N)$ и $U_{\text{ТГ1}}(N)$ – соответственно, напряжения на ТГ2 и ТГ1 в зависимости от номера записи в файл.

Для экспериментального стенда $D_{\text{Ш1}'} + d = 20$ мм и $D_{\text{Ш1}} + d = 35,45$ мм; $D_{\text{Ш2}' + d} = 20,1$ мм и $D_{\text{Ш2}} = 105,95$ мм, откуда $i_1 = 1,77$ и $i_2 = 5,27$.

Для приведения результатов эксперимента к зависимости $i_{\text{зк}}^C(t)$ использовалось то, что $t = N/v$, где v – частота записи показаний уровня сигнала в файл данных, установленная программно перед проведением эксперимента, t – время, отсчитываемое с начала регистрации показаний тахогенераторов.

Относительная погрешность эксперимента складывается из относительной погрешности замеров деталей экспериментального стенда для получения i_1 и i_2 , которая определяется погрешностью мерительного инструмента из относительной погрешности установки шкивов и из относительной погрешности АЦП. Максимальная относительная погрешность измерения диаметров шкивов составляет $\pm 0,5\%$, относительная погрешность АЦП составляет $\pm 0,25\%$. Относительные погрешности тахогенераторов, вызванные нелинейностью характеристик (в соответствии с технической документацией), составляют $\pm 1,0\%$. Если не учитывать погрешности установки шкивов и погрешности интервалов времени АЦП, общая относительная погрешность эксперимента составит $3,5\%$.

Анализ кинематограмм показывает, что для данного образца среднее значение передаточного отношения, определенное экспериментально, в рассматриваемом интервале времени $i_{\text{ср}} = 28,773 \pm 3,5\%$, в то время как передаточное число для этой передачи равно 28,0. Относительная погрешность в этом случае равна 6,2%.

Для анализа закономерности изменения передаточного отношения за один оборот золотника был произведен анализ периодичности графика изменения передаточного отношения за один оборот зубчатого колеса в целях определения цикла изменения передаточного отношения передачи исследуемого механизма. Подобная методика схематизации данных испытаний по экстремальным значениям описана в работах [2–5]. Суть анализа, проведенного в этих работах, заключается в выделении экстремальных значений передаточного отношения в экспериментальных данных. После этого (с учетом многозонности зацепления) определялось среднеарифметическое значение периода изменения передаточного отношения из зависимости

$$T_{\text{ср}} = k_2 \sum_{i=1}^n (T/k_2) / n, \quad (4)$$

где n – количество интервалов между соседними максимальными значениями; T_i – значение времени полуцикла изменения передаточного отношения, соответствующее временному интервалу, заключенному между соседними максимальными значениями.

В результате расчета по зависимости (4) получено, что период повторения графика для ПГД-1 составляет в среднем $T_{\text{ср}} = 1,19$ сек. ($N = 0..13750$). Основываясь на этом, на рис. 5 мы показали изменение передаточного отношения за указанный период от $t = 0$ сек. до $t = 1,1$ сек., соответствующий циклу; а на рис. 6 – за период от $t = 0,5$ сек. до $t = 1,1$ сек., соответствующий полуциклу.

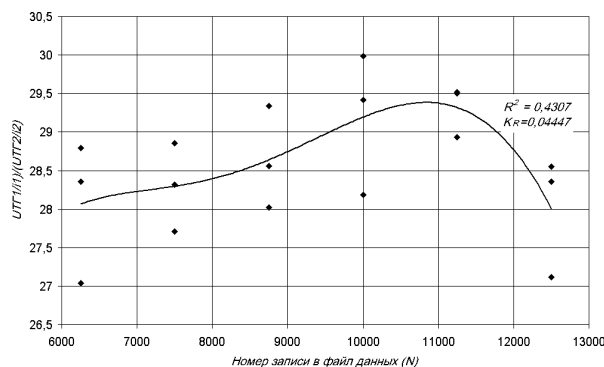


Рис. 5. Передаточное отношение передачи ПГД-1 в период от 0,5 до 1,1 сек. ($N = 6250..13750$)

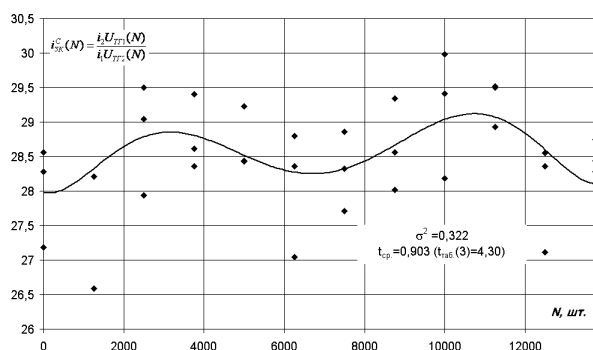


Рис. 6. Передаточное отношение передачи ПГД в период от 0 до 1,1 сек. (при $N = 0..13750$)

Анализ графика (рис. 5) показывает, что практический характер изменения передаточного отношения плунжерной передачи ПГД за один оборот золотника-распределителя в целом соответствует данным, полученным теоретическими исследованиями [6].

Библиографические ссылки

1. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента. Свердловск : Изд-во УПИ, 1975. 140 с.
2. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высш. шк., 1988. 263 с.
3. Лотар З. Статистическое оценивание. М. : Статистика, 1976. 190 с.

Получено 24.11.2017

4. Система обработки экспериментальных данных для ЭВМ ЕС 1010 / М. Б. Левин, Л. А. Мамонова, А. Б. Одуло, Д. Е. Розенберг. М. : Наука, 1983. 160 с.
5. Левин М. Б., Одуло А. Б., Розенберг Д. Е. Пакеты прикладных программ как составная часть автоматизации научных исследований. М. : Наука, 1986. 195 с.
6. Каракулов М. Н., Каракулова Е. В. Анализ кинематики плунжерного зацепления // Вестник ИжГТУ. 2009. № 1. С. 27–30.

References

1. Spiridonov A. A., Vasil'ev N. G. (1975). *Planirovaniye eksperimenta* [Experiment design]. Sverdlovsk: UPI (in Russ.).
2. L'vovskii E. N. (1988). *Statisticheskiye metody postroyeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow: Vysshaya shkola (in Russ.).
3. Lotar Z. (1976). *Statisticheskoye otsenivaniye* [Statistical estimation]. Moscow: Statistika (in Russ.).
4. Levin M. B., Mamonova L. A., Odulo A. B., Rosenberg D. E. (1983). *Sistema obrabotki eksperimentalnykh dannykh dlya EVM YES 1010* [A system for processing experimental data for EC 1010 computers]. Moscow: Nauka (in Russ.).
5. Levin M. B., Odulo A. B., Rosenberg D. E. (1986). *Pakety prikladnykh programm kak sostavnaya chast' avtomatizatsii nauchnykh issledovaniy* [Packages of applied programs as an integral part of automation of scientific research]. Moscow: Nauka (in Russ.).
6. Karakulov M. N., Karakulova E. V. (2009). *Vestnik IzhGTU* [Bulletin of IzhSTU], no. 1, pp. 27-30 (in Russ.).