

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-168–174

УДК 62.50

## **Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий**

**Я. А. Гусенцова<sup>1)</sup>, Е. С. Гусенцова<sup>2)</sup>, А. А. Коваленко<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Луганский национальный аграрный университет (Луганск, Республика Украина),

<sup>2)</sup>Луганский университет имени В. Даля (Луганск, Республика Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Выполнено сравнение различных методов идентификации динамических характеристик объектов, связанных с генерацией тепловой энергии или охлаждением теплоносителя в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены идентификация по реакции на стандартные воздействия – ступенчатое, импульсное и гармоническое. Показано, что в ряде случаев для рассматриваемого типа объектов их использование не приемлемо. Тогда целесообразно применять статистические характеристики сигналов на входе и выходе в процессе нормальной эксплуатации, т. е. использовать данные так называемого пассивного эксперимента. При этом задача состоит из двух этапов – определения статистических характеристик случайных сигналов на входе и выходе объекта и вычисления по ним динамических характеристик. Статистические характеристики случайных процессов на входе и выходе получены посредством осреднения по времени значений случайных величин, зависящих от ординат процессов. Поскольку случайные процессы, происходящие в рассматриваемых объектах, обладают свойством эргодичности, их средние значения являются постоянными. Вся необходимая информация для расчета характеристик линейных систем содержится в их корреляционной функции. Теплогенерирующие объекты и системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания являются объектами, охваченными обратной связью через регулятор. Поэтому в этом случае для определения их динамических характеристик использованы взаимно коррелированные функции. Предложенный метод расчета динамических характеристик по случайным воздействиям дает хорошее совпадение с результатами активного эксперимента, приведенными в различных источниках. Это позволяет рекомендовать метод определения динамических характеристик для рассматриваемого типа объектов с помощью случайных сигналов.

**Ключевые слова:** динамические характеристики, теплогенерирующий объект, импульсная функция, переходная характеристика, случайный процесс, взаимно коррелированные функции

**Для цитирования:** Гусенцова, Я. А. Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий / Я. А. Гусенцова, Е. С. Гусенцова, А. А. Коваленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 168–174

---

### **Адрес для переписки**

Гусенцова Яна Алимовна  
Луганский национальный  
аграрный университет  
ул. Андрея Линёва, городок ЛНАУ,  
91008, г. Луганск, Республика Украина  
Тел.: (0642) 65-34-40  
gusentsova@gmail.com

### **Address for correspondence**

Gusentsova Yana A.  
Lugansk National  
Agrarian University  
Andrey Linev str., LNAU student quarter,  
91008, Lugansk, Republic of Ukraine  
Tel.: (0642) 65-34-40  
gusentsova@gmail.com

---

## Ascertainment of Dynamic Characteristics of the Industrial Facilities by Means of Stochastic Actions

Ya. A. Gusentsova <sup>1)</sup>, Ye. S. Gusentsova <sup>2)</sup>, A. A. Kovalenko <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Lugansk National Agrarian University (Lugansk, Republic of Ukraine),

<sup>2)</sup>Lugansk University n. a. V. Dal (Lugansk, Republic of Ukraine)

**Abstract.** The paper presents comparison of different methods for identifying the dynamic characteristics of objects associated with thermal energy generation or the medium cooling in the cooling systems of internal-combustion engines. Reaction identification to the reference exposure is considered, videlicet – stepwise, impulse and harmonic. The study shows that on a number of occasions for the type of objects being involved their application is unacceptable. In those instances it is expedient to apply statistical characteristics of the input and output signals, i. a. to employ the data of so-called passive experiment. In which case the task is divisible into two stages – determination of statistical characteristics of the variates at the ins and outs of the object and calculation of the dynamic characteristics based on them. The statistical characteristics of the variates at the input and output are obtained through time averaging of values of the variates dependent on the ordinate of the processes. Inasmuch as stochastic processes occurring in the objects under examination possess ergodic property, their averaged values are constant. All the data required for calculating characteristics of the linear systems appears in their correlative functions. Heat generating objects as well as the cooling systems of internal-combustion engines are the objects fed back by the regulator. Therefore, in this instance cross-correlated functions are employed for determining their dynamic characteristics. The suggested random-input analytical method for dynamic characteristics constitutes a good match with the results of active experiments reported in a variety of sources. This allows recommending the random signals estimation method of dynamic characteristics for the involved type of objects.

**Keywords:** dynamic characteristics, heat-generating object, impulse function, step response, stochastic process, cross-correlated functions

**For citation:** Gusentsova Ya. A., Gusentsova Ye. S., Kovalenko A. A. (2016) Ascertainment of Dynamic Characteristics of the Industrial Facilities by Means of Stochastic Actions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 168–174 (in Russian)

### Введение

Повышение надежности и экономичности установок, тем или иным образом связанных с генерированием тепловой энергии, зависит от работы рационально спроектированной тепловой схемы, широкого внедрения энергосберегающих технологий и альтернативных источников энергии, экономии топлива, тепловой и электрической энергии. Энергосбережение и оптимизация систем производства и распределения тепловой энергии, корректировка энергетических и водных балансов позволяют улучшить перспективы развития теплоэнергетики и повысить технико-экономические показатели оборудования установок. Это относится как непосредственно к установкам, производящим теплоту [1], так и к другим, связанным с тепловой энергией системам, таким как системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания [2, 3]. Рядом исследований установлено, что при оптимальном температурном режиме работы дизеля тепловоза достигаются повышение его эффективного использования, снижение расхода топлива на измеритель работы и износа деталей цилиндропоршневой группы. Такой температурный режим характеризуется температурой охлаждающей воды (85–95 °С) и масла (70–75 °С) [3].

Анализ влияния температуры воды и масла на технико-экономические показатели дизеля убедительно подтверждает необходимость поддержания их на оптимальном уровне. Чтобы поддерживать температуру охлаждающей воды и масла дизеля в допустимых пределах, на тепловозах применяют систему автоматического регулирования температуры в разнообразном техническом исполнении [3].

Во всех рассмотренных случаях экономичность установок зависит от правильного выбора регулятора температуры, его закона регулирования, а это в свою очередь зависит от динамических характеристик объекта регулирования – теплогенерирующего устройства или двигателя внутреннего сгорания [4].

### Цель и методы исследования

Построение математических моделей объектов и определение их динамических характеристик выполняли аналитически или экспериментально. В первом случае уравнения динамики и статики составляли на основе анализа физико-химических процессов, происходящих в объекте, и применения законов сохранения энергии и вещества. Целью работы являлась идентификация объекта, т. е. определение коэффициентов уравнения динамики. Для этого требовалась постановка специальных лабораторных исследований [5].

Для экспериментальных методов нужны были минимальные сведения о сущности процессов, протекающих в исследуемых объектах. Однако они позволяли с приемлемой для практики точностью определять коэффициенты дифференциальных уравнений динамики. Эти методы просты в применении, и с их помощью сравнительно быстро получали математическое описание объекта. Вследствие этого они широко применялись при исследовании динамики объектов для целей автоматизации.

### Основная часть

Переходные процессы в линейном объекте с сосредоточенными параметрами [6] однозначно описываются дифференциальным уравнением типа

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_0 x(t), \quad (1)$$

или передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t) \exp(-pt) dt}{\int_0^{\infty} x(t) \exp(-pt) dt} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_0}, \quad (2)$$

где  $X(p)$ ,  $Y(p)$  – преобразованные по Лапласу входная  $x(t)$  и выходная  $y(t)$  координаты;  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_m, \dots, b_0$  – постоянные коэффициенты;  $n < m$ .

Определение коэффициентов уравнений (1) и (2) исследуемых объектов можно производить экспериментальным путем как реакцию исследуемого устройства на задающее воздействие. В реальных условиях работы задающее воздействие может быть любой функцией времени. Более того, она способна менять свой характер при переходе от одного режима работы системы к другому. Чтобы не решать каждый раз частную задачу исследования динамики элемента при конкретном входном сигнале, а получить довольно полное представление о динамических свойствах элемента в результате одного решения уравнения динамики, целесообразно ввести некоторое типовое задающее воздействие, которое отражает наиболее вероятный режим работы элементов.

В качестве типовых задающих воздействий используют [5, 6]:

- единичное ступенчатое воздействие  $1(t)$  – функцию, неизменную по величине и равную единице для всех моментов времени  $t > 0$ , а при значениях  $t < 0$  равную 0;
- дельта-функцию – функцию Дирака, которая представляет собой импульс бесконечно большой амплитуды с бесконечно малой длительностью;
- гармонический сигнал – гармонические колебания с постоянной амплитудой, равной единице. Этот сигнал может задаваться как в комплексной, так и в вещественной формах, в виде синусоидального или косинусоидального колебания.

Приведенные методы определения динамических характеристик объектов с помощью подачи на вход исследуемого канала испытательного воздействия не всегда применимы. На некоторых объектах крайне нежелательна подача специальных возмущений [7]. В этих случаях для определения динамических свойств могут быть использованы статистические характеристики сигналов на входе и выходе объекта, имеющих место в процессе его нормальной эксплуатации. При этом задача разбивается на два этапа:

- определение статистических характеристик случайных процессов, воздействующих на объект;
- вычисление по ним характеристики исследуемого объекта.

Как теплогенератор, так и система охлаждения двигателя [2, 5] являются системами, охваченными отрицательной обратной связью через регулятор. В данном случае входной случайный процесс, определяемый рядом возмущений, оказывается коррелированным через обратную связь с шумом (рис. 1). Поэтому импульсная функция исследуемого объекта имеет вид

$$R_{yx_1}(\tau) = \int_0^{\infty} R_{xx_1}(\tau - \theta) K(\theta) d\theta. \quad (3)$$

Затем решение проводят различными методами, например методом перебора коэффициентов импульсной функции с минимизацией среднеквадратичной ошибки аппроксимации.

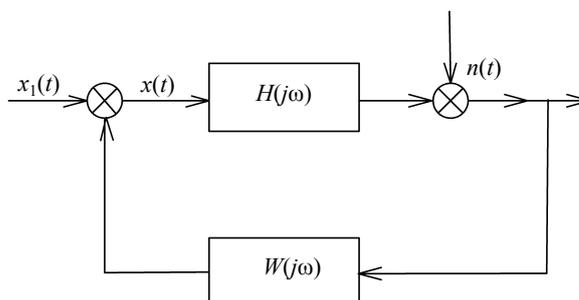


Рис. 1. Структурная схема объекта с обратной связью

Fig. 1. Structural diagram of an object with a feedback

Передаточную функцию теплогенераторов находили по формуле [1, 8]

$$W(p) = \frac{\bar{T}_t(p)}{\bar{\Theta}_r} = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^n}, \quad (4)$$

где  $k_0$  – коэффициент усиления;  $\tau$  – время транспортного запаздывания;  $T_t$  – постоянная времени;  $n$  – порядок дифференциального уравнения (1).

Такой вид передаточной функции вызван тем, что процесс теплоотдачи от газа к теплоносителю в котле происходит через достаточно толстую стенку, тепловую инерционность которой необходимо учитывать [9–10]. Ей соответствует уравнение кривой разгона

$$\bar{T}_r(t) = \left[ 1 - \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{t^i}{T^i i!} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right] k_0,$$

которое связано с импульсной функцией

$$\delta(t) = [\bar{T}_r(t)]',$$

При экспериментах в качестве исходных данных использованы записи температуры теплоносителя на выходе объекта и расхода топлива на входе, которые осуществлялись стандартными приборами [7]. Динамические характеристики теплогенерирующих установок представлены в табл. 1. Через дробь приведены данные, полученные с помощью анализа переходной характеристики [7]. Переменные  $n$  и  $\tau$  соответствуют формуле (4).

Таблица 1

Динамические характеристики теплогенерирующих установок  
Dynamic characteristics of heat-generating facilities

Марка котла, параметры	КВ-ГМ-10	ТВГ-8М	КСВ	ДЕ-4-13ГМ
$n$	3	3	3	3
$\tau$ , с	40/37	35/34	30/29	35/37
Постоянная времени при нагрузке, с	73/70	72/72	82/89	79/83
Постоянная времени при разгрузке, с	88/85	80/81	96/92	90/91
Теплопроизводительность котла, ГВт (Гкал/ч)	42 (10,0)	35 (8,3)	15,1 (3,6)	25,2 (6,0)

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод определения передаточной функции с помощью случайных входных воздействий дает хорошее совпадение с результатами активного эксперимента, т. е. определение передаточной функции по реакции на ступенчатое воздействие.

2. Общий вид передаточной функции теплогенерирующих установок может быть представлен в виде статического звена третьего порядка и звена транспортного запаздывания.

3. Время транспортного запаздывания для всех испытанных котлов оказалось примерно одинаковым и равным ~35 с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андрийчук, Н. Д. Термодинамика для инженеров-строителей / Н. Д. Андрийчук, Е. А. Иващенко, А. А. Коваленко. Луганск: Изд-во СНУ имени В. Даля, 2005. 304 с.
2. Гогайзель, В. А. Регулирование температуры теплоносителя системы охлаждения автомобиля / В. А. Гогайзель, А. А. Коваленко. Луганск: Изд-во ВНУ имени В. Даля, 2011. 199 с.
3. Кулешова, Э. И. Динамическая статистика теплогенерирующих объектов / Э. И. Кулешова, А. А. Коваленко, Я. А. Гусенцова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2013. № 18 (207). С. 29–32.
4. Gusentsova, E. Influence of Aerodynamic Characteristics on the Heat Exchange in the Cooling Systems // ТЕКА. 2012. Vol. 12, No 3. P. 46–50.
5. Регуляторы в системах воздушного отопления и вентиляции / Е. А. Иващенко [и др.]. Луганськ: Вид-во СНУ імя В. Даля, 2006. 141 с.
6. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, О. А. Судник. М.: Колос, 2003. 344 с.
7. Гусенцова, Я. А. Идентификация динамических характеристик теплогенерирующих объектов по случайным входным сигналам / Я. А. Гусенцова, Э. И. Кулешова, А. А. Коваленко // Materiały IX Międzynarodowej Naukowi – Praktycznej Konferencji “Nauka: Teoria i Praktyka-2013”, 7–15 Sierpnia 2013 roku. Przemysł: Nauka i Studia. 2013. Vol. 10: Matematyka. Fizyka. Nowoczesne Informacyjne Technologie. Budownictwo i Architektura. Techniczne Nauki. Fizyczna Kultura i Sport. С. 55–57.
8. Landerheinecke, K. Thermodynamic für Ingenieure / K. Landerheinecke, P. Gany, E. Satter. Viewegs Fachbücher der Technik, 2003. 336 p.
9. Недопекин, Ф. В. Теория теплопереноса / Ф. В. Недопекин. Донецк: ДонГУ, 1991. 192 с.
10. Димніч, А. Х. Теплопровідність / А. Х. Димніч, О. А. Троянівський. Донецьк: Норд-Пресс, 2004. 370 с.

Поступила 31.08.2015    Подписана в печать 29.10.2015    Опубликовано онлайн 30.03.2016

## REFERENCES

1. Andriychuk N. D., Ivaschenko Ye. A., Kovalenko A. A. (2005) *Thermodynamics for Civil Engineers*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 304 p. (in Russian).

2. Gogayzel V. A., Kovalenko A. A. (2011) *Automobile Coolant System Automatic Regulation*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 199 p. (in Russian).
3. Kuleshova E. I., Kovalenko A. A., Gusentsova Ya. A. (2013) Dynamical Statistics of the Heat-Generating Objects. *Visnik Skhidnoukraińskogo Natsionalnogo Universitetu imeni Volodimira Dalia* [Visnik of the Volodymyr Dal East Ukrainian National University], 18 (207), 29–32 (in Russian).
4. Gusentsova E. (2012) Influence of Aerodynamic Characteristics on the Heat Exchange in the Cooling Systems. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 12 (3), 46–50.
5. Ivashchenko E. A., Diadichev K. M., Gusentsova Ya. A., Kovalenko A. A., Sokolov V. I. (2006) *Controls in the Hot-Air Heating and Ventilation Systems*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 141 p. (in Russian).
6. Borodin I. F., Sudnik O. A. (2003) *Technological Processes Automation*. Moscow, Kolos. 344 p. (in Russian).
7. Gusentsova Ya. A., Kuleshova E. I., Kovalenko A. A. (2013) Random-Excitation Identification of Dynamical Characteristics of the Heat-Generating Objects. *Materiały IX Międzynarodowej Naukowi – Praktycznej Konferencji “Nauka: Teoria i Praktyka – 2013”, 7–15 Sierpnia 2013 roku. Vol. 10, Matematyka. Fizyka. Nowoczesne Informacyjne Technologie. Budownictwo i Architektura. Techniczne Nauki. Fizyczna Kultura i Sport. Przemysł, Nauka i Studia*, 55–57 (Article in Russian; title of the book in Czech).
8. Landerheinecke K., Gany P., Satter E. (2003) *Thermodynamik für Ingenieure*. Viewegs Fachbücher der Technik. 336 p. (German).
9. Nedopekin F. V. (1991) *Heat and Mass Transfer Theory*. Donetsk: Donetsk National University. 192 p. (in Russian).
10. Dymnich A. Kh., Troyanivskiy O. A. (2004) *Thermal Conductivity*. Donetsk: Nord-Press. 370 p. (in Ukrainian).

Received: 31 August 2015

Accepted: 29 October 2015

Published online: 30 March 2016