

А. В. Меликов

## МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕЖИМЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Известно, что определение динамических характеристик датчиков механических величин выполняется по откликам на известные воздействия. Сначала оценивается погрешность описания модели, затем находятся параметры математической модели для порядка, выбранного по дифференциальным критериям. Необходимость применения таких критериев обусловливается использованием погрешности описания модели. Следует учесть, что в случае повышения порядка модели уменьшается погрешность ее описания, т. е. чем выше порядок рассчитываемой математической модели, тем точнее описание отклика. Однако в случае целенаправленного завышения порядка описываемой модели высока вероятность появления несуществующих составляющих и (или) расщепления одной из них. Отсюда возникает задача, суть которой заключается в разработке методики моделирования известного отклика, характеризующегося наименьшими погрешностями. Отмечается, что поставленная задача дополняется ограничением: при ее решении необходимо найти для рассчитываемой математической модели такие параметры, которые удовлетворяют условию минимальной погрешности. При численном моделировании проверяется, насколько точно разработанная методика позволит определить эти параметры, чего невозможно добиться при обработке реальных данных. Устранить вышеприведенные трудности возможно при использовании имитационного моделирования в задачах коррекции динамических характеристик средств измерений без останова их работы. Главная сложность заключается в том, что заранее неизвестны ни порядок математической модели, ни ее погрешность. Для выбора порядка математической модели применяется минимизация погрешности ее описания, при этом учитывается суммарное влияние всех составляющих. Предложенная методика позволяет определять совокупность свойств объекта, которые характеризуются в конкретный момент времени признаками и значениями параметров, или уточнять его характеристики без демонтажа самого объекта.

**Ключевые слова:** средства измерений, динамические характеристики средств измерений, имитационный подход.

### Состояние проблемы

Объект исследования – датчики механических величин, применяемые в условиях, когда доступ к ним ограничен, т. е. демонтаж датчиков, с целью определения совокупности свойств объекта, которые характеризуются в момент времени признаками и значениями параметров, или для уточнения его характеристик, осуществить невозможно. Демонтаж сопровождается остановкой устройств, на которых установлены датчики, что увеличивает экономические и технические затраты. Возникает вопрос: как выполнить демонтаж, не останавливая устройство? Очевидна необходимость создания методов и средств, позволяющих производить поверку датчиков механических величин самими датчиками.

Простым и надежным способом представляется не только создание средств измерений, в которых предусмотрена возможность самоповерки, но и разработка методик, реализующих поверку. Преимущества подобных методик:

- идентификация динамических характеристик средств измерений осуществляется с минимальными затратами при условии, что технический объект продолжает работу;
- отсутствует необходимость создания испытательной аппаратуры (как правило, дорогостоящей);
- отменяется оперативная возможность получения индивидуальных полных динамических характеристик средств измерений, вследствие чего не проводятся дорогостоящие испытания с целью выявления таких индивидуальных характеристик.

Реализация этого метода основана на выборе способа определения динамических характеристик [1]. Однако предпочтительнее реализовать выбранный способ по характеристическим сигналам, когда на вход подается дельта-импульс или единичный скачок, или по синусоидальному воздействию. Однако следует учитывать, что в подобных случаях необходимо создание условия, при котором амплитуда импульса будет большей – для возбуждения свободных коле-

баний. Примером может быть создание импульса с короткой длительностью; при этом выхода за амплитудный диапазон, где обеспечивается, собственно, линейность средств измерений, допускать ни в коем случае нельзя. Это требование и является самым трудновыполнимым, особенно в случае, когда испытательное оборудование невозможно установить на устройство, т. е. когда задачу необходимо решать в режиме эксплуатации объекта.

### Постановка задачи

В рамках разрабатываемой методики должны быть выполнимыми следующие действия [2]:

1. Поиск полных динамических характеристик для датчиков механических величин (допускается их использование, но желательнее найти индивидуальные характеристики для экземпляра средств измерений).

2. Создание для средств измерений воздействия на опорных частотах, выбранных заранее, с целью полного охвата рабочего частотного диапазона.

3. Создание имитационной модели для определенного типа средств измерений (допускается, что средство измерений описывается передаточной функцией второго порядка:

$$G(z) = \frac{k}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$
 с собственной частотой  $f_1$  и декрементом затухания  $\alpha_1$ . В этом случае

моделируются отклонения как собственной частоты  $f_1$ , так и декремента затухания  $\alpha_1$ .

4. Моделирование всевозможных отклонений с заранее определенным шагом и требуемой точностью (для отдельного отклонения  $f_{1i}$  и  $\alpha_{1i}$  рассчитываются параметры  $a_i^* = \{a_{1i}^*, a_{2i}^*\}$ ,

затем моделируется поверочное воздействие на коэффициенты для каждой пары  $f_1$  и  $\alpha_1$ , что соответствует каждой опорной частоте  $G(f_k) = G_i\{a_{1i}, a_{2i}, k_i\}$ . Таким образом, получается матрица с  $n$  моделируемыми параметрами.

5. При самопроверке в результате выполнения расчетов сопоставления находятся искомые параметры, соответствующие расчетам.

Главное отличие предлагаемой методики от аналогов: при ее применении имитируются все возможные отклонения с соответствующими коэффициентами, затем коэффициенты, полученные при испытаниях, сопоставляются с рассчитанными параметрами, что освобождает от необходимости в ходе каждого последующего испытания производить большой объем вычислений [3].

Для начала предлагается рассмотреть имитационный подход к моделированию известного отклика  $F$  с наименьшими погрешностями [4], с учетом множества составляющих математической модели  $M$  при условии, что  $M = M\{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$ , где  $Y_i$  –  $i$ -я составляющая модели,  $i = 1 \div p$ , причем  $p$  – истинный порядок модели. Основная задача – определение параметров  $Q = \{\alpha_i, f_i, A_i, \phi_i\}$ , где  $\alpha_i, f_i, A_i, \phi_i$  – декремент затухания, собственная частота, амплитуда, фаза  $i$ -й составляющей  $M$  с заранее неизвестным порядком  $p$ .

### Имитационный подход к моделированию

Поставленная задача дополняется условием нахождения требуемого параметра с минимальной погрешностью.

При обработке реальных данных, применяя численное моделирование, невозможно проверить, насколько точно требуемые параметры определяются предложенной методикой. Имитационное моделирование – это только основа при решении подобных задач.

Многие из моделей, построенные с использованием имитационного подхода, содержат некие последовательности компонентов, возникающие в них согласно конкретному алгоритму или по определенной схеме. В этом случае логика возникновения таких компонентов по схеме может быть задана, при обобщении, в одном операторе. Имитационный язык транслирует эти операторы в последовательность событий, которые происходят с компонентами выбранной модели. Таким образом, операторы определяют ту последовательность событий, которая автоматически – по мере продвижения элементов через систему – выполняется имитационным языком.

Обозначим:  $x_i$  – отсчеты для  $i = 0 \div (N - 1)$ ,  $N$  – количество отсчетов;  $\Delta t$  – шаг дискретизации. Следовательно, осталось найти порядок выбранной модели описания датчика и параметры  $Q$ :

$$Q = Q\{\alpha_i, f_i, A_i, \phi_i\}, i = 1 \div p,$$

$$Y_i = A_i \exp[(\alpha_i + 2\pi j f_i)(n - 1)\Delta t + j\Theta_i], n = 1 \div N.$$

Если принять во внимание, что порядок математической модели заранее известен, то для вычисления оценки авторегрессионных параметров используется следующая система уравнений:

$$\begin{pmatrix} x_p & x_{p-1} & \cdots & x_1 \\ x_{p+1} & x_p & \cdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \cdots & x_{N-p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x_p \\ x_{p+1} \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}.$$

Однако сложность заключается в том, что ни погрешность математической модели, ни ее порядок заранее неизвестны.

Для выбора порядка модели применяется минимизация погрешности описания [5]. Способы снижения динамических погрешностей в датчиковых системах, ориентированные на работу в системе реального времени (измеряемые физические величины изменяются во времени), бесспорно, интересны, тем более что комплексный метод, направленный на минимизацию суммарной динамической погрешности, действительно повышает показатели качества систем. Однако преимущество предлагаемой методики заключается в добавлении в искомый отклик составляющих для математической модели  $Y_d$  с известными характеристиками  $Q_d$ , что повышает порядок модели на два, т. е.  $p_d = p + 2$ .

Затем для  $n = 1 \div N$  вычисляем:  $x_{dn} = x_n + A_d \exp[(\alpha_d + 2\pi j f_d)(n - 1)\Delta t + j\Theta_d]$ . Для полученной модели составляем систему уравнений:

$$\begin{pmatrix} x_{dp} & x_{d(p-1)} & \cdots & x_{d1} \\ x_{d(p+1)} & x_{dp} & \cdots & x_{d2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{d(N-1)} & x_{d(N-2)} & \cdots & x_{d(N-p)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ \vdots \\ a_{dp} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x_{dp} \\ x_{d(p+1)} \\ \vdots \\ x_{dN} \end{pmatrix}.$$

Параметры  $\alpha$  вычисляются с помощью метода наименьших квадратов.

Следует отметить, что применение имитационного подхода к моделированию отклика с наименьшими погрешностями имеет следующие преимущества:

- упрощает задачу определения порядка модели;
- позволяет получать искомые оценки с требуемой точностью.

### Описание методики

Предлагаемая методика реализована с помощью имитационного моделирования.

**Первый шаг** – поиск индивидуальных динамических характеристик. Предполагается, что дискретная передаточная функция в авторегрессионной форме уже найдена [6]. Другими словами, величины не имеют одинакового распределения, но с ростом параметра распределение начнет стремиться к предельному. В любом случае формулы выражают дисперсию авторегрессии через ее автоковариационную функцию. Не менее интересным видится выражение дисперсии авторегрессии только через ее коэффициенты. Для этого необходимо решить систему Юла – Уокера произвольного порядка относительно неизвестных автоковариационных функций. Сделать это можно для какого-нибудь частного случая, например для авторегрессионного процесса второго порядка:  $AR[p = 2]$ .

**Второй шаг** – выбор опорных частот:  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ .

На **третьем шаге** для всех входящих в передаточную функцию коэффициентов составляются всевозможные отклонения; другими словами, на заданных опорных частотах моделируются всевозможные отклонения одного значения передаточной функции, в зависимости от декрементов затуханий и собственных частот средства измерений.

**Четвертый шаг** – табулирование передаточной функции в опорных точках частот для различных отклонений (здесь составляется матрица отклонений  $M_{op} = M[p_1, p_2, \dots, p_n]$ ).

**Пятый шаг** состоит в самопроверке значений на опорных частотах, их поиске посредством передаточной функции  $S = S\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , где  $s_i = s(f_i)$ . Для нахождения передаточной функции, соответствующей найденным значениям  $s_i$ , необходимо сравнить полученные значения  $S$  с соответствующей матрицей отклонений  $M$ .

Выше уже отмечалось, что предлагаемая методика по реализации проще аналогичных. Однако следует дополнить, что на первом этапе, который соответствует периоду до проведения поверочных испытаний, безусловно, производится значительно больший объем вычислений, нежели в аналогах. Следовательно, разработанной методике требуется некоторый объем памяти для накопления и хранения протабулированных значений.

**Пример.** Рассматривается средство измерений с передаточной функцией второго порядка  $G(z) = \frac{k}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$  с параметрами  $Q = Q\{k, a_1, \dots, a_2\}$ . Рассчитываются собственная частота и декремент затухания по известным коэффициентам  $Q$ :

$$f_0 = \frac{\arctg\left[\frac{\text{Im}(z_0)}{\text{Re}(z_0)}\right]}{2\pi\Delta t}, \quad \alpha_0 = \frac{\ln|z_0|}{\Delta t},$$

где  $z_0$  – корень характеристического уравнения

$$z^2 + a_1 z + a_2 = 0, \quad z_0 = \frac{-a_1}{2} \pm j\sqrt{a_2 - \frac{a_1^2}{4}}.$$

Далее моделируются отклонения собственной частоты и декрементов затухания от истинных значений [7, 8]. Как для собственной частоты, так и для декремента затухания выбираются  $K$  точек в стороны, соответствующие увеличению и уменьшению значений, с шагами  $\Delta_f$  и  $\Delta_a$ . Количество опорных частот выбирается равным  $N$ . Протабулированные значения передаточной функции заносятся в матрицу отклонений  $M$ . Затем производятся поверочные испытания на опорных частотах. Следующим действием находятся значения передаточной функции  $s_i$ . Сравнивая  $s_i$  с таблицей протабулированных значений, находим кривую, соответствующую передаточной функции, и коэффициенты  $f_i$  и  $\alpha_i$ . Зная эти коэффициенты, можно найти  $a'_1, a'_2$  из преобразований

$$\alpha'_1 = \frac{2 \exp(\alpha_i \Delta t)}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(2\pi \Delta t f_i)}}, \quad \alpha'_2 = \exp(\alpha_i \Delta t).$$

По известным  $a'_1, a'_2$  находим передаточную функцию, которая соответствует полученным результатам.

Безусловно, возможно протабулировать и другие коэффициенты, в частности авторегрессионные  $a_1, \dots, a_2$ . Но тогда табуляция декрементов затухания, впрочем, как и собственных частот, направленно позволит уменьшить количество вычисляемых при использовании этой методики параметров, т. к. будут рассматриваться лишь имеющие физический смысл значения матрицы отклонений.

**Выводы**

Разработанная методика коррекции динамических характеристик средств измерений, основанная на использовании сигналов на опорных частотах с заранее известными характеристиками, позволяет скорректировать параметры полных динамических характеристик без остановки работы самого устройства. Применение методики позволит облегчить задачу определения порядка модели и получить искомые оценки с требуемой точностью.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Иосифов В. П.* Анализ математических моделей измерительных преобразований // Вестн. Северо-Кавказ. гос. техн. ун-та. 2005. № 4. С. 82–88.
2. *Иосифов В. П.* Имитационный подход к проблеме определения динамических характеристик средств измерений // Инженерный вестник Дона. 2010. Т. 14, № 4. С. 359–363.
3. *Дмитриенко А. Г., Иосифов В. П., Мясникова М. Г.* Методика обработки откликов датчиков с цензурированными отсчетами // Датчики и системы. 2012. № 7. С. 6–7.
4. *Каталевский Д. Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учеб. пособие. М.: Изд. дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 513 с.
5. *Кузнецов Ф. И.* Минимизация динамических погрешностей в датчиковых системах мониторинга и управления в реальном масштабе времени // Изв. Южн. федер. ун-та. Технические науки. 2014. № 4 (153). С. 63–68.
6. *Подлесный С. А., Зандер Ф. В.* Устройства приема и обработки сигналов. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
7. *Иосифов В. П., Щербаков М. А.* Имитационный подход к методу обработки откликов датчиков механических величин // Датчики и системы. 2014. № 10. С. 26–29.
8. *Kamaev V., Iosifov V., Melikov A., Korobkin D.* Simulation of the problem determination of dynamic characteristics of measuring // IISA 2015: WS13: CIT: CIT & DS Creativity in intelligent technologies & data science. 2015. P. 130–34.

Статья поступила в редакцию 31.05.2016

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Меликов Алексей Владимирович** – Россия, 400002, Волгоград; Волгоградский государственный аграрный университет; канд. техн. наук; доцент кафедры информационных систем и технологий; AlexeyV.Melikov@yandex.ru.



*A. V. Melikov*

**METHODS OF CORRECTION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS  
OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE MODE OF THEIR USAGE**

**Abstract.** It is known that the determination of the dynamic characteristics of mechanical quantities sensors is performed on the response to the known effects. First, the error description of the model is estimated, then the parameters of the mathematical model for the order chosen by the differential criteria are found. The need for such criteria is caused by using the error description of the model. It should be taken into account that in case of increase of the order of the model its description error decreases, i. e. the higher the order of the calculated mathematical model, the more accurate description of the response. However, in case of deliberate overstatement of the order described by the model, the probability of occurrence of non-existent components and/or splitting of one of them, becomes rather high. Hence the problem arises, the essence of which is to develop a technique of modeling the known response, characterized by the least errors. It is noted that the task set is complemented with restriction: for its solution it is necessary to find for the required calculated mathematical model such parameters, which satisfy the minimum error. Numerical simulations verify how well the developed technique will determine these parameters, which cannot be achieved in the processing of real data. The solution of the above difficulties is seen in simulation modeling in the correction tasks of dynamic characteristics of measuring instruments without interrupting their work. Here the main problem is that neither order of the mathematical model nor its

error is known. To select the mathematical model it is necessary to minimize the error of describing it, taking into consideration the total effect of all the components. The proposed method helps determine a combination of the properties of an object, which are characterized with features and values of the parameters at a certain time period, or to specify its characteristics without deinstallation of the object.

**Key words:** measuring instruments, dynamic characteristics of measuring instruments, simulation modeling of measuring instruments.

#### REFERENCES

1. Iosifov V. P. Analiz matematicheskikh modelei izmeritel'nykh preobrazovaniy [Analysis of the mathematical models of measuring transformations]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 4, pp. 82–88.
2. Iosifov V. P. Imitatsionnyi podkhod k probleme opredeleniia dinamicheskikh kharakteristik sredstv izmerenii [Simulation approach to the problem of determination of the dynamic characteristics of measuring instruments]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 359–363.
3. Dmitrienko A. G., Iosifov V. P., Miasnikova M. G. Metodika obrabotki otklikov datchikov s tsenzurovannymi otschetami [Methods of processing sensor response with censored reports]. *Datchiki i sistemy*, 2012, no. 7, pp. 6–7.
4. Katalevskii D. Iu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniia i sistemnogo analiza v upravlenii* [Basis of the simulation and system analysis in management]. Moscow, Izdatel'skii dom «Delo» RANKhiGS, 2015. 513 p.
5. Kuznetsov F. I. Minimizatsiia dinamicheskikh pogreshnostei v datchikovykh sistemakh monitoringa i upravleniia v real'nom masshtabe vremeni [Minimization of the dynamic errors in sensor systems of monitoring and live management]. *Izvestiia Iuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 4 (153), pp. 63–68.
6. Podlesnyi S. A., Zander F. V. *Ustroistva priema i obrabotki signalov. Versiia 1.0* [Elektronnyi resurs]: elektron. ucheb. posobie. Krasnoiarsk: IPK SFU, 2008.
7. Iosifov V. P., Shcherbakov M. A. Imitatsionnyi podkhod k metodu obrabotki otklikov datchikov mekhanicheskikh velichin [Simulation approach to the method of processing of sensor response of the mechanical values]. *Datchiki i sistemy*, 2014, no. 10, pp. 26–29.
8. Kamaev V., Iosifov V., Melikov A., Korobkin D. Simulation of the problem determination of dynamic characteristics of measuring. IISA 2015: WS13: CIT: CIT & DS Creativity in intelligent technologies & data science, 2015, pp. 130–134.

The article submitted to the editors 31.05.2016

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Melikov Aleksey Vladimirovich** – Russia, 400002, Volgograd; Volgograd State Agrarian University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Information System and Technology; AlexeyV.Melikov@yandex.ru.

