# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С МОДЕЛЬЮ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

***Юрасова Екатерина Валерьевна***
*канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, доцент Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск*
*E-mail: urasova2004@gmail.com*

# DYNAMIC CHARACTERISTICS MEASURING SYSTEM WITH SENSOR MODEL TO ANALYZE THE ELECTRICAL INPUT SIGNALS

***Ekaterina Yurasova***
*PhD, Associate Professor of Information and Measuring equipment department, assistant professor of Federal State Funded Educational Institution of Higher Professional Education "South Ural State University" (National Research University), Chelyabinsk*

## АННОТАЦИЯ

Рассматривается структура измерительной системы, содержащая модель первичного измерительного преобразователя и реализующая модальное управление динамическими характеристиками. На ее основе разработан метод подстройки динамических параметров измерительного канала под шумовую обстановку на выходе первичного измерительного преобразователя. Предложенную систему можно использовать для анализа входных воздействий электроустановок в рабочем и аварийном режимах.

## ABSTRACT

The structure of the measuring system that based on a sensor model and implements modal control of dynamic characteristics is examined. On its basis a method of dynamic parameters adjustment depending on the noise level at the output of the sensor is developed. The proposed system can be used to analyze the electrical input signals in operation and emergency operation.

**Ключевые слова:** измерительная система; модальное управление; динамические характеристики.

**Keywords:** measurement system; modal control; en dynamic measurement.

При проведении контроля входных параметров электрических схем и устройств в рабочем и аварийном (пробой) режимах возникает необходимость восстановить форму неизвестного входного сигнала или пробивающего импульса. Такие измерения всегда проводятся в динамическом режиме, когда основной составляющей погрешности является динамическая погрешность.

Анализ работ по теории динамических измерений показывает, что хорошо разработаны методы коррекции динамической погрешности на основе решения интегрального уравнения свертки [7, с 32], а также методы на основе использования обратного преобразования Фурье с параметром регуляризации по А.Н. Тихонову [7, с. 33]. За последнее десятилетие в Южно-Уральском государственном университете сложилось направление научных исследований по восстановлению динамически искаженных измерительных сигналов. В рамках этого направления разрабатываются методы, алгоритмы и специализированное программное обеспечение обработки данных динамических измерений [1, 2, 3, 5, 6]. Результаты работ публикуются в России и за рубежом и находят внедрение в компьютерных испытательно-измерительных системах. Активно разрабатываются методы коррекции динамической погрешности на основе теории автоматического управления [3, с. 5], в которых возможно использование структур с моделями первичного измерительного преобразователя [7].

В данной статье представлена базовая измерительная информационная система с моделью первичного измерительного преобразователя

Для минимизации суммарной динамической погрешности воспользуемся моделью измерительной системы с модальным управлением динамическими характеристиками на основе модели датчика [7]. Структура измерительной системы включает в себя полную динамическую модель первичного измерительного преобразователя (ИП), выход которого связан с аналогичной полной динамической моделью, охваченной обратными связями с изменяемыми коэффициентами $k_0, k_1, \ldots, k_{n-1}$ и фильтром с коэффициентами

$d_0, d_1, \ldots, d_m$ на $m$ интеграторах.

Запишем дифференциальное уравнение первичного измерительного преобразователя:

$$p^n y + a_{n-1} p^{n-1} y + \ldots + a_0 y = b_m p^m u + b_{m-1} p^{m-1} u + \ldots + b_0 u, \quad (1)$$

где: $y$ — выходной сигнал первичного ИП;

$u$ — входной измеряемый сигнал первичного ИП;

$a_0, a_1, \ldots, a_{n-1}, b_0, b_1, \ldots, b_m$ — постоянные коэффициенты ( $m<n$ );

$p = d/dt$ — оператор дифференцирования.

Аналогичным образом модель первичного ИП, присутствующая в измерительной системе как реальное звено, описывается уравнением:

$$p^n y_м + a_{n-1} p^{n-1} y_м + \ldots + a_0 y_м = b_m p^m u_м + b_{m-1} p^{m-1} u_м + \ldots + b_0 u_м, \quad (2)$$

где: $y_м$, $u_м$ — выходной и входной сигналы модели датчика.

Наличие полной динамической модели первичного датчика в структуре измерительного преобразователя устанавливает идентичность дифференциальных уравнений, характеризующих динамические свойства первичного датчика и его модели. Поэтому, если их выходные сигналы будут близки друг к другу, то и их входные сигналы будут мало отличаться один от другого, при наличии регуляризующего действия измерительного канала. Следовательно, по входному сигналу модели, который доступен для наблюдения, можно судить о входном сигнале датчика, для наблюдения недоступном. Значит, критерием оптимальной настройки параметров измерительной системы служит близость выходных сигналов первичного ИП и его модели.

Согласно уравнению (1), передаточная функция первичного ИП:

$$W_{Д}(p)=\frac{y(p)}{U(p)}=\frac{b_m p^m+b_{m-1}p^{m-1}+\ldots+b_1 p+b_0}{p^n+a_{n-1}p^{n-1}+\ldots+a_1 p+a_0}, \qquad (3)$$

где: $y(p)$ — изображение выходного сигнала датчика;

$U(p)$ — изображение выходного сигнала датчика.

Модель первичного ИП, описываемая уравнением (2), имеет эту же передаточную функцию. Передаточная функция измерительной системы при отсутствии шума, приведенного к выходу датчика, имеет вид:

$$W_{ис}(p)=\left.\frac{U_{м}(p)}{U(p)}\right|_{V(p)=0}=$$
$$=\frac{(b_m-d_m)p^m+(b_{m-1}-d_{m-1})p^{m-1}+\ldots+(b_1-d_1)p+(b_0-d_0)}{p^n+(a_{n-1}-k_{n-1})p^{n-1}+\ldots+(a_1-k_1)p+(a_0-k_0)}. \qquad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что изменяя настраиваемые параметры $k_0, k_1, \ldots, k_{n-1}, d_0, d_1, \ldots, k_m$, т. е. задавая нули и полюса передаточной функции измерительной системы, можно получить любую желаемую передаточную функцию системы. Причем, каждый из настраиваемых параметров влияет на один коэффициент передаточной функции. При изменении этих параметров изменяется и передаточная функция по приведенной шумовой составляющей, что приводит к усилению шума в выходном сигнале измерительной системы. При этом наличие выходного и входного сигналов модели позволяет оценить динамическую погрешность измерительной сисиемы. Для этого сформируем сигнал ошибки:

$$e_0=y-y_{м}\frac{a_0-k_0}{b_0-d_0}=W_{ис}\left(u-u_{м}\frac{a_0-k_0}{b_0-d_0}\right)=W_{ис}e_{ис}, \qquad (5)$$

где: $e_{ис}$ — истинная погрешность измерительной системы.

Формирование разности сигналов по выражению (5) дает оценку погрешности измерительной системы, искаженную от истинной оценки точно также, как искажен выходной сигнал первичного ИП относительно входного.

Для минимизации суммарной динамической погрешности, обусловленной инерционность первичного ИП, шумами и помехами, присутствующими на его выходе, воспользуемся базовой структурой измерительной системы. Сигнал на выходе датчика в этом случае примет вид:

$$y_{д} = y + V, \tag{6}$$

где: $V$ — высокочастотный шум на выходе датчика.

Рассмотрим случай, когда управление осуществляется только полюсами передаточной функции измерительной системы. Из структурной схемы измерительной системы [*? с.], с учетом реально действующего на выходе первичного ИП сигнала шума, можно записать:

$$\begin{gathered} u_{м} = u \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1}) p^{n-1} + \cdots + (a_0 - k_0)} + \\ + V \frac{p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1}) p^{n-1} + \cdots + (a_0 - k_0)} \end{gathered}. \tag{7}$$

Тогда передаточная функция системы при отсутствии на выходе первичного ИП сигнала шума имеет вид:

$$W(p) = \frac{u_{м}(p)}{u(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1}) p^{n-1} + \cdots + (a_0 - k_0)}, \tag{8}$$

а передаточная функция по шуму:

$$W_e(p) = \frac{u_м(p)}{V(p)} = \frac{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \cdots + a_0}{p^n + (a_{n-1} - k_{n-1})p^{n-1} + \cdots + (a_0 - k_0)}. \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что изменяя настраиваемые параметры можно получить оптимальную для данного уровня шума передаточную функцию измерительной системы. Оценка суммарной динамической погрешности производилась на основе структуры дополнительного канала оценивателя погрешности [7]. При прохождении шума, присутствующего в выходном сигнале первичного ИП, в выходной сигнал модели происходит его усиление. Сигнал погрешности вида (5) этого усиления не почувствует. Следовательно, формирование ошибки необходимо провести так, чтобы она чувствовала это усиление. Поэтому, за сигнал погрешности примем:

$$e_1 = W(p) \cdot e_{ис}. \tag{10}$$

Выражение (10) обеспечивает усиление шума в погрешности в той же степени, что и его усиление в выходном сигнале измерительной системы, т. к.:

$$e_1 = W(p)e_{ис} + V\frac{W(p)}{W_{ис}(p)}. \tag{11}$$

Из (11) видно, что динамическое соотношение между уровнями полезного сигнала и сигнала шума в оценивателе погрешности полностью аналогично данному соотношению в измерительном преобразователе. Значит, критерием настройки коэффициентов на их оптимальное для данного уровня шума значение можно считать минимум оценки динамической погрешности, получаемой из канала оценивателя.

Для подтверждения вышеизложенной теории было произведено математическое моделирование измерительной системы динамических параметров, построенного на основе датчика второго порядка с передаточной функцией:

$$W_Д(p) = \frac{1}{p^2 + a_1 p + a_0}, \tag{11}$$

где: $a_0 = b_0$.

В этом случае передаточная функция системы, приведенная к единичному коэффициенту усиления, примет вид:

$$W_{uc}(P) = \frac{b_0}{p^2 + (a_1 - k_1)p^1 + (a_0 - k_0)} \; \frac{a_0 - k_0}{b_0}. \tag{12}$$

Здесь присутствуют два настраиваемых коэффициента $k_0$, $k_1$.

Рассмотрим первый случай, когда измерения проводятся в рабочем режиме. Входной измеряемый сигнал примем: $u(t) = 1 \cdot \sin(100 \cdot t)$, а дополнительный сигнал шума на выходе датчика: $v(t) = 0.05 \cdot \sin(1000 \cdot t)$.

Результаты математического моделирования приведены на рисунке 1. Оптимальное значение настраиваемых коэффициентов ярко выделяется минимумом динамической погрешности. Настройка параметров на оптимальное значение позволило снизить погрешность измерения на 80 %, по отношению к уровню погрешности датчика.

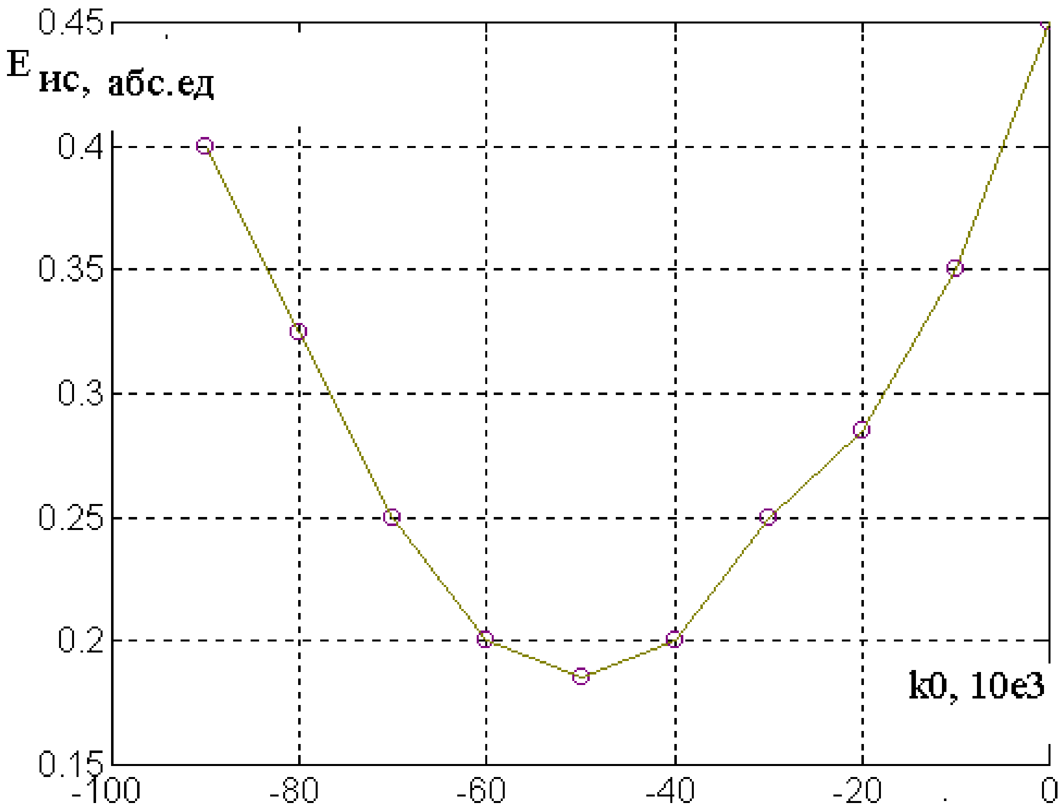


***Рисунок 1. Влияние коэффициента обратной связи на величину погрешности измерительной системы***

Рассмотрим второй случай, когда измерения проводятся при аварийном режиме электроустановок. В качестве модели этой ситуации на вход первичного датчика подавался прямоугольный импульс достаточной, для окончания переходного процесса, длительности. Сигнал шума на выходе первичного измерительного преобразователя остался неизменным. Результаты математического моделирования показали, что настройка динамических параметров измерительной системы на оптимальные, для данного уровня шума, значения снизила погрешность измерения на 50 % от уровня шума датчика.

Использование модели измерительной системы с модальным управлением динамическими характеристиками на основе модели первичного ИП позволяет восстановить входной сигнал первичного измерительного преобразователя с высокочастотными шумами на выходе с меньшей динамической погрешностью. Представленный измерительный преобразователь может быть использован при анализе входных воздействий электроустановок.

**Список литературы:**


1. Бизяев М.Н. Динамические модели и алгоритмы восстановления динамически искаженных сигналов измерительных систем в скользящем режиме: Автореф. дис. канд. техн. наук — Челябинск, 2004. — 23 с.
2. Волосников А.С. Нейросетевые модели и алгоритмы восстановления сигналов динамических измерительных систем: Автореф. дис. канд. техн. наук — Челябинск, 2006. — 20 с.
3. Солдаткина Е.В. Алгоритмы адаптации параметров измерительной системы к минимуму оценки динамической погрешности: Автореф. дис. канд. техн. наук — Челябинск, 2000. — 20 с.
4. Солопченко Г.Н. Обратные задачи в измерительных процедурах //Измерения, контроль, автоматизация. — 1983. — № 2. — С. 32—46.
5. Шестаков А.Л. Оптимальное измерение динамически искаженных сигналов / Шестаков А.Л., Свиридюк Г.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. — 2011. — № 17 (234). — С. 70—75.
6. Шестаков А.Л. Решение обратной задачи динамики измерений с использованием вектора состояния первичного измерительного преобразователя / Шестаков А.Л., Ибряева О.Л., Иосифов Д.Ю. //Автометрия. — 2012. — Т. 48. — № 5. — С. 74—81.
7. Shestakov A.L. Dynamic error correction method // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 1996. — Т. 45. — № 1. — С. 250—255.