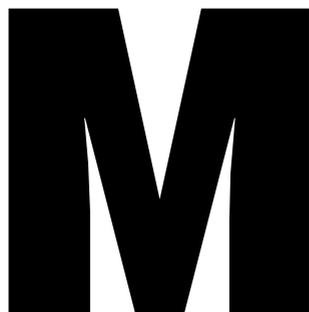


Методика анализа погрешностей алгоритмов вычислений электрических величин в ЦИП

Автор считает, что при определении/оценивании метрологических характеристик алгоритмов и программ обработки данных целесообразно пользоваться методом математического моделирования, особенно актуальным при испытаниях типа современных микропроцессорных цифровых электроизмерительных приборов



Н.Н. Вострокнутов

доцент кафедры «Электрические измерения» ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», Москва, vostrkit@mail.ru, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

метрологическую аттестацию алгоритмов и программ обработки данных в составе прикладного программного обеспечения конкретных измерительных устройств рекомендуется выполнять в соответствии с [1]. При этом должна анализироваться «Методическая погрешность результата измерений, обусловленная неидеальностью алгоритма обработки данных, — составляющая погрешности результата измерения, получаемая при применении алгоритма к точным исходным данным (не содержащим погрешностей) при условии точного выполнения всех арифметических и логических операций. К сожалению, в [1] нет указаний, как конкретно выполнять эту работу.

Вопрос о конкретной методике аттестации программ обработки данных особенно актуален при испытаниях типа современных микропроцессорных цифровых электроизмерительных приборов (ЦИП). ЦИП электрических величин строятся по структурной схеме (см. рис. 1).

Результаты измерений мгновенных значений процесса в течение времени в 1,5–2 раза больше длительности периода основной частоты процесса, сохраняются в стеке типа Fi-Fo. Вычисление оценки W значения измеряемой величины по мгновенным значениям процесса выполняется с помощью микропроцессора и программного компонента по данным, хранящимся в стеке. Результат измерения (оценка W) может быть представлен на визуальном отсчетном устройстве или передан для дальнейшего использования другим устройствам.

Существенным отличием структуры, изображенной на рис. 1, от структуры традиционных ЦИП является наличие программного компонента 4, задающего алгоритм вычисления зна-

чения измеряемой величины по отсчетам мгновенных значений измеряемого процесса $X(t)$. Свойства программного компонента могут существенно влиять на погрешность результата измерений [2]. Погрешности ЦИП, построенного по структуре, представленной на рис. 1, полностью определяются свойствами элементов 1, 2 и 4. Остальные элементы на погрешность не влияют.

Элементы 3 и 4 могут выполнять ряд вспомогательных функций: автоматическое определение полярности напряжения, автоматический выбор пределов измерения, автоматическую коррекцию погрешностей аналогоцифрового преобразователя (АЦП), в частности, устранение дифференциальной нелинейности АЦП, действующих по кодоимпульсному принципу, и др. Выполнение некоторых из этих функций, например коррекция погрешностей, может оказывать влияние на погрешность цифровых электроизмерительных приборов.

Рассмотрим влияние алгоритма вычислений на погрешность оценки следующих параметров переменного напряжения как измеряемого процесса:

- ▶ действующее (среднее квадратическое) значение процесса W_E ;
- ▶ среднее значение постоянной составляющей процесса W_A ;
- ▶ действующее значение переменной составляющей процесса W_{AL} .

Расчет перечисленных параметров (оценок их значения) может выполняться двумя способами:

- ▶ по известным формулам электротехники;
- ▶ с использованием быстрого (дискретного) преобразования Фурье [3].

В последнем случае расчет может выполняться отдельно для каждой гармоники процесса, становится возможным проведение спектрального

ключевые слова

метрологическая аттестация, алгоритмы и программы обработки данных, погрешность оценки параметров, математическое моделирование

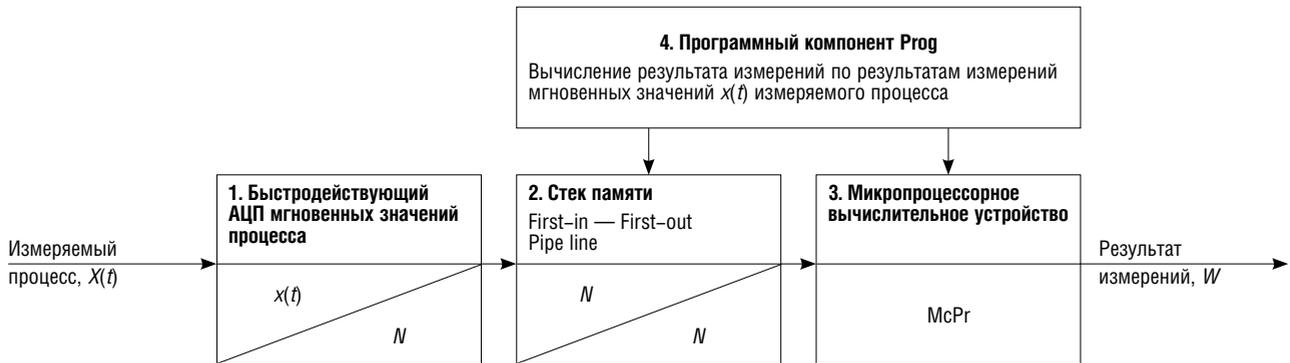


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорного ЦИП

анализа измеряемого процесса. Применение первого способа характерно для сравнительно простых ЦИП. Второй способ широко применяется в электроэнергетике, когда некоторые виды защит должны реагировать на отдельные составляющие спектра измеряемого напряжения. Например, работа некоторых видов защит должна блокироваться, если вторая гармоника напряжения превышает 30 % действующего значения первой гармоники, или 5-я гармоника превышает 15 % действующего значения первой гармоники, или для анализа аварийной ситуации необходим спектральный анализ переходных процессов.

При дальнейшем рассмотрении примем во внимание, что могут использоваться три режима работы АЦП в составе ЦИП:

- ▶ интервал времени T_C между измерениями мгновенных значений постоянный, определяется заданным четным числом N отсчетов мгновенных значений за период T_0 основной частоты. Моменты выполнения отсчетов не синхронизированы с измеряемым процессом;
- ▶ интервал времени T_C между измерениями мгновенных значений постоянный, определяется заданным четным числом N отсчетов мгновенных значений за период T_0 основной частоты. Моменты выполнения отсчетов синхронизированы с моментами перехода процесса через нуль (используется чаще других);
- ▶ интервал T_C времени между измерениями мгновенных значений авто-

матически подстраивается так, чтобы в течение фактического периода T_{0f} основной частоты процесса выполнялось заданное (постоянное) четное число N отсчетов мгновенных значений. Моменты выполнения отсчетов синхронизированы с моментами перехода процесса через нуль.

Под основной частотой f_0 процесса будем понимать частоту, приписываемую процессу по определению, например, 50 Гц для процессов, связанных с использованием силовой сети переменного напряжения.

Интервал T_C выбирается на основании теоремы В.А. Котельникова [4] в зависимости от номера наивысшей существенной гармоники процесса. На основании требований [5] при измерениях в сетях промышленной частоты можно считать существенными 1-ю, 3-ю, 5-ю и 7-ю гармоники. Поэтому значение T_C не должно быть более

$$T_C \leq \frac{1000}{2 \cdot 7 \cdot 50} = 1,4 \text{ мс.} \quad (1)$$

За период промышленной частоты должно быть сделано $N \geq 14$ отсчетов мгновенных значений измеряемого процесса. Следовательно, быстродействие АЦП в составе ЦИП должно быть более 700 измерений в секунду.

При более высоких существенных гармониках может применяться стробоскопический метод сбора данных, который в нашей статье не рассматривается.

По результатам измерения мгновенных значений вычисляются следующие параметры.

Вопрос о конкретной методике аттестации программ обработки данных особенно актуален при испытаниях типа современных микропроцессорных цифровых электроизмерительных приборов

1. Оценка среднего (за период основной частоты) значения W_A измеряемых тока и напряжения или апериодическая (постоянная) составляющая тока и напряжения:

$$W_A = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x(k), \quad (2)$$

где k — номер отсчета мгновенного значения измеряемого процесса в течение периода основной частоты.

2. Оценка действующего (за период основной частоты) значения W_E измеряемых величин тока и напряжения:

$$W_E = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x(k)^2}. \quad (3)$$

3. Оценка действующего значения (за период основной частоты) W_{AL} переменной составляющей процесса:

$$W_{AL} = \sqrt{W_E^2 - W_A^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x(k)^2 - \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x(k) \right)^2}. \quad (4)$$

Поскольку теорема В.А. Котельникова относится к категории предельных, перечисленные выше формулы дадут правильный результат (погрешность вычислений равна нулю) только при $N = \infty$. Кроме того, во всех предыдущих рассуждениях мы не учитывали наличия наследуемых погрешностей [1, 2], обусловленных наличием погрешностей измерения значений $x(k)$ с помощью реального АЦП. В [1] эта составляющая погрешности результата измерения определена как «4. Трансформированная погрешность — составляющая погрешности результата

измерения, обусловленная наличием погрешностей исходных данных, поступающих на обработку, и их преобразованием с помощью алгоритма (программы)».

При конечном, но достаточно большом значении N погрешность вычислений получится близкой к нулю только в том случае, если погрешности АЦП, входящего в состав цифровых электроизмерительных приборов, равны нулю и он работает в третьем режиме из перечисленных выше. В дальнейшем не будем останавливаться на учете трансформируемых погрешностей, их анализ — особая задача.

В [1] выделяются три возможных основных подхода к определению (оцениванию) метрологических характеристик алгоритмов (программ): аналитический, численные расчеты показателей точности, математическое моделирование.

Аналитический анализ погрешностей вычислений по описанному алгоритму, особенно учет влияния на погрешность вычислений наличия (отсутствия) синхронизации работы АЦП с частотой сети, приводит к необозримым, совершенно не наглядным формулам, практическое значение которых ничтожно.

То же можно сказать о численной оценке влияния отклонения фактической частоты сети от номинальной на погрешность вычислений при конечном значении числа отсчетов N . Поэтому для анализа погрешностей рассматриваемого и других алгоритмов целесообразно пользоваться методом программного моделирования по аналогии с [6, 7]. Для создания соответствующих математических моделей удобно пользоваться известным программным пакетом MathCad.

Рассмотрим модель оценивания погрешностей описанного алгоритма.

В качестве исходных данных при моделировании задаются:

- ▶ X_0 — постоянная составляющая измеряемого процесса;
- ▶ X_1, X_3, X_5, X_7 — действующие значения 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник спектра измеряемого процесса;

- ▶ $\psi_1, \psi_3, \psi_5, \psi_7$ — фазовые углы гармоник;
- ▶ $f_0 = 50$ Гц — номинальное значение основной частоты процесса;
- ▶ f — фактическое значение основной частоты процесса;
- ▶ $N = 2n$ — четное число отсчетов мгновенных значений за период основной номинальной частоты.

По этим данным вычисляются
▶ действующее значение процесса:

$$X = \sqrt{X_0^2 + X_1^2 + X_3^2 + X_5^2 + X_7^2}; \quad (5)$$

▶ действующее значение переменной составляющей процесса:

$$X_{AL} = \sqrt{X_1^2 + X_3^2 + X_5^2 + X_7^2}; \quad (6)$$

▶ интервал времени между измерениями мгновенных значений:

$$h = \frac{1}{N \cdot f_0}. \quad (7)$$

Формула для вычисления мгновенных значений процесса (без наследуемых погрешностей):

$$x(k) = X_0 + X_1 \cdot \sin(\omega \cdot h \cdot k + \varphi_1) + X_3 \cdot \sin(3\omega \cdot h \cdot k + \varphi_3) + X_5 \cdot \sin(5\omega \cdot h \cdot k + \varphi_5) + X_7 \cdot \sin(7\omega \cdot h \cdot k + \varphi_7), \quad (8)$$

где k — порядковый номер (1, 2, ..., N) отсчета (измерения мгновенных значений);

ω — фактическая угловая частота процесса, $\omega = 2\pi f$.

Используя средства построения графиков, предоставляемые пакетом MathCad, и приведенное математическое описание (модель) процесса, можно построить график процесса (сплошная линия), график первой гармоники (точечная жирная линия), графики 3-й и 5-й гармоник (точечные линии), график 7-й гармоники (сплошная тонкая линия), полученные с использованием описанной модели (рис. 2). При построении графиков приняты данные [5] для нормальных условий в сети: 1-я гармоника — 100 %; 3-я гармоника

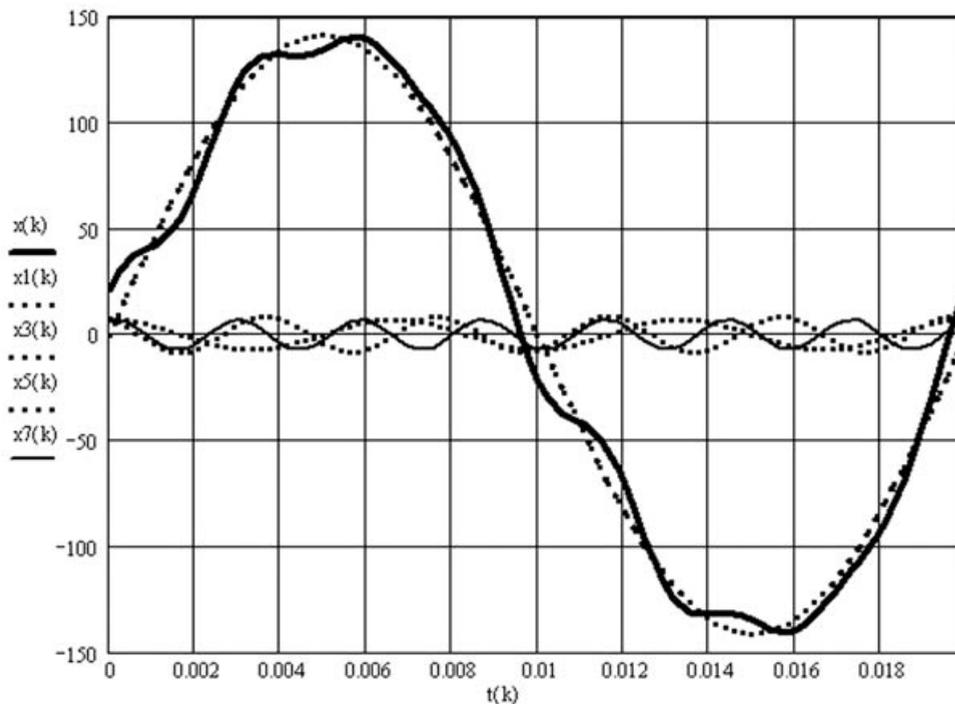


Рис. 2. График процесса и его составляющих:

$t(k)$ — время, сек; $x(k)$ — смоделированный график процесса, %;

$x_1(k), x_3(k), x_5(k), x_7(k)$ — графики 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник соответственно, %

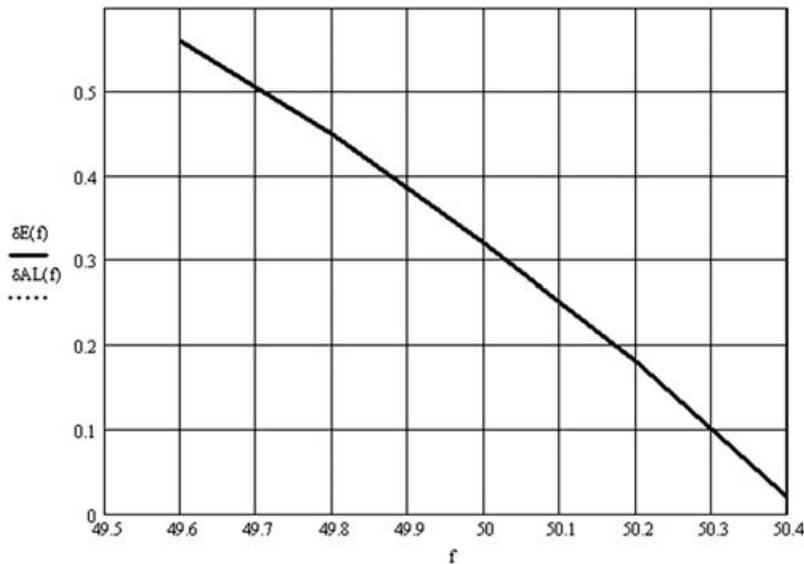


Рис. 3. Зависимость погрешности алгоритма от частоты при $N = 10$:
 f — частота, Гц; $\delta E(f)$, $\delta AL(f)$ — относительные погрешности вычисления действующего значения процесса и действующего значения переменной составляющей процесса, %

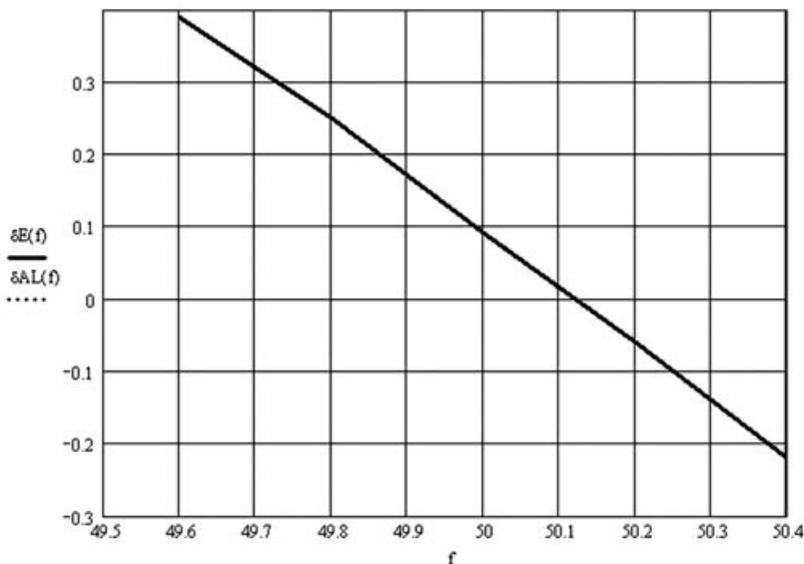


Рис. 4. Зависимость погрешности алгоритма от частоты при $N = 14$:
 f — частота, Гц; $\delta E(f)$, $\delta AL(f)$ — относительные погрешности вычисления действующего значения процесса и действующего значения переменной составляющей процесса, %

меньше или равна 5 %; 5-я гармоника меньше или равна 6 %; 7-я гармоника меньше или равна 5 % (предельные условия: 1-я — 100 %; 3-я — 7,5 %; 5-я — 9 %; 7-я — 7,5 %).

Для оценки погрешности алгоритма напишем выражения оценок параметров (измеряемых величин) для алгоритма, реализованного в цифровом электроизмерительном приборе, вычисляем оценки параметров процесса по исследуемому алгоритму.

1. Оценка (результат вычисления) среднего значения процесса или апериодической составляющей по формуле (2).
2. Оценка действующего значения процесса по (3).
3. Оценка действующего значения переменной составляющей процесса по (4).

Погрешности вычислений по принятому алгоритму равны:

- ▶ действующего значения процесса $\Delta_E = W_E - X$;
- ▶ действующего значения переменной составляющей процесса $\Delta_{AL} = W_{AL} - X_{AL}$;
- ▶ постоянной составляющей процесса $\Delta_A = W_A - X_0$.

Для исследования зависимости погрешности алгоритма вычислений при работе АЦП с синхронизацией и без подстройки частоты преобразования к частоте сети (режим 2) воспользуемся моделью, реализованной с помощью программного пакета MathCad. Построим графики погрешности расчета действующего значения процесса и его переменной составляющей в зависимости от частоты сети. При этом будем считать, что частота изменяется в предельно допускаемых по [5] границах от 49,6 до 50,4 Гц.

Из теоремы В.А. Котельникова следует, что число N отсчетов мгновенных значений процесса в течение периода основной частоты должно быть не менее удвоенного номера высшей учитываемой гармоники процесса. На рис. 3, 4, 5 представлены графики зависимости погрешности от частоты при разных N : 10, 14, 16.

При $N = 10$ в соответствии с теоремой В.А. Котельникова в измерениях учтены только 1-я и 3-я гармо-

ники, поэтому на рис. 3 при частоте 50 Гц погрешность существенно отлична от нуля, а погрешность алгоритма лежит в пределах от 0,7 % до 0,02 %.

Кривые погрешности алгоритма для действующего значения процесса и переменной составляющей процесса сливаются.

При $N = 14$ в соответствии с теоремой В.А. Котельникова в измерениях учтены 1-я, 3-я и 5-я гармоники, поэтому на рис. 4 при частоте 50 Гц погрешность уменьшилась, а погрешность алгоритма лежит в пределах от + 0,4 % до минус 0,2 %. Кривые погрешности алгоритма для действующего значения процесса и переменной составляющей процесса сливаются.

При $N = 16$ в соответствии с теоремой В.А. Котельникова в измерениях учтены все 1-я, 3-я, 5-я и 7-я гармоники процесса, поэтому на рис. 5 при частоте 50 Гц погрешность равна нулю, а погрешность алгоритма лежит в пределах $\pm 0,35$ %. Заметно расхождение кривых погрешности для действующего значения процесса и переменной составляющей процесса.

Похожее явление можно наблюдать при наличии в спектре процесса постоянной составляющей. Из рис. 6 видно изменение кривых погрешности (по сравнению с рис. 5), обусловленное наличием 5-процентной постоянной составляющей в спектре процесса. Это обусловлено тем, что на оценку переменной составляющей начинает оказывать влияние погрешность оценки постоянной составляющей процесса.

При выполнении приведенного анализа при испытаниях типа конкретного прибора можно сделать важный практический вывод: **предел допускаемой относительной погрешности приборов этого типа не может быть меньше 0,35 %**. Если в документации на тип нормирован предел относительной погрешности, меньший 0,35 %, следует считать, что разработчик неосознанно или умышленно вводит будущих потребителей прибора в заблуждение.

Следует отметить, что такое обстоятельство не может быть выявлено

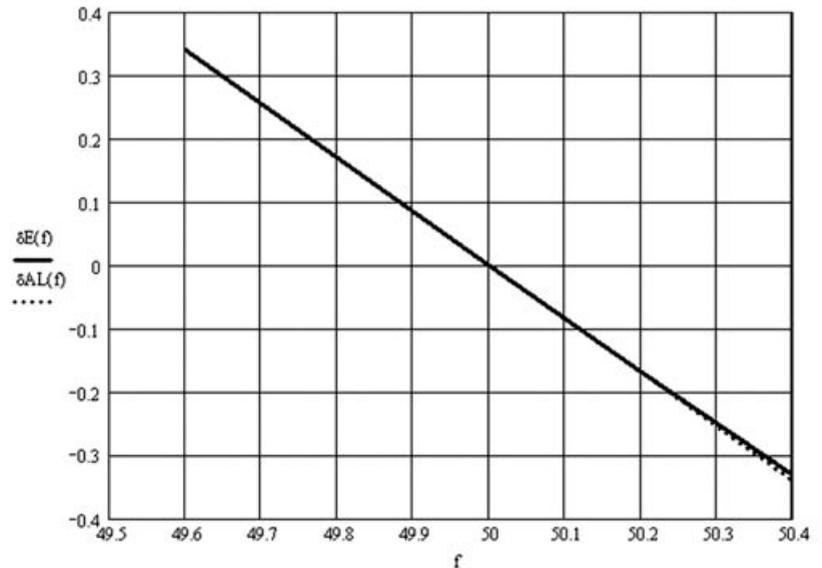


Рис. 5. Зависимость погрешности алгоритма от частоты при $N = 16$: f — частота, Гц; $\delta E(f)$, $\delta AL(f)$ — относительные погрешности вычисления действующего значения процесса и действующего значения переменной составляющей процесса, %

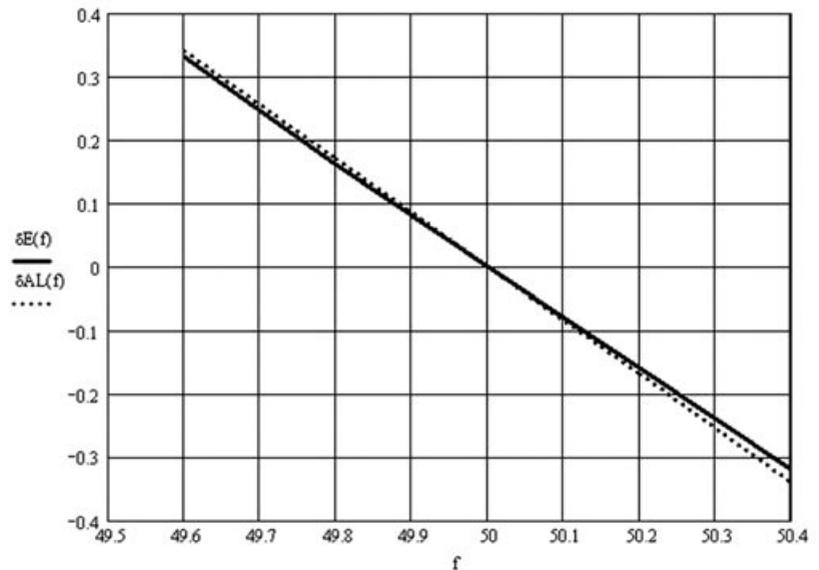


Рис. 6. Зависимость погрешности алгоритма от частоты при $N = 16$ и наличия постоянной составляющей процесса, равной 5 %: f — частота, Гц; $\delta E(f)$, $\delta AL(f)$ — относительные погрешности вычисления действующего значения процесса и действующего значения переменной составляющей процесса, %

экспериментально в процессе испытаний опытных образцов прибора. Если в энергосистеме, откуда получает питание испытательная лаборатория, частота устойчиво поддерживается в пределах $(50 \pm 0,1)$ Гц, как, например, в ОАО «Мосэнерго», то погрешности алгоритма будут близки к нулю, и они не могут быть выявлены без проведения специального эксперимента, позволяющего оценить влияние изменения частоты сети питания прибора на его погрешность.

Используя аналогичные приемы моделирования, можно проанализировать погрешности алгоритма, обусловленные другими факторами, например фазовыми сдвигами или соотношениями амплитуд гармонических составляющих процесса.

Аналогичным образом можно провести анализ погрешностей вычисления параметров измеряемого процесса по другим алгоритмам, например с использованием дискретного преобразования Фурье. ■

Список литературы

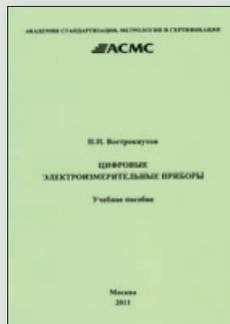
1. МИ 2174–91 ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.
2. Вострокнутов Н.Н., Кузнецов В.П., Солопченко Г.Н. К вопросу об объекте метрологической аттестации программ обработки данных при измерениях // Измерительная техника. — 1990. — № 7.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. — М.: 1974.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13–е изд., исправл. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
5. ГОСТ 13109–97. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Вострокнутов Н.Н., Земельман М.А., Гитис Э.И. Перспективы использования ЭЦВМ для моделирования средств измерений и методов их поверки при испытаниях и метрологической экспертизе // Измерительная техника. — 1978. — № 6.
7. Вострокнутов Н.Н. Машинно-ориентированное описание процесса определения и контроля погрешности // Измерительная техника. — 1979. — № 8.

НОВАЯ КНИГА

Вострокнутов Н.Н.

Цифровые электроизмерительные приборы

Учебное пособие. — М.: АСМС, 2011



Кратко изложены общие сведения о цифровых измерительных приборах и преобразователях. Рассматриваются принципы действия, состав погрешностей, а также поверка и калибровка цифровых электроизмерительных приборов.

Учебное пособие предназначено для слушателей, обучающихся по дисциплине «Поверка и калибровка средств электрических измерений».

По вопросам приобретения обращайтесь по адресу: Академия стандартизации, метрологии и сертификации (АСМС), 109443, Москва, Волгоградский пр-т, 90, корп. 1. Тел. / факс: 8 (499) 742 4643. Факс: 8 (499) 742 5241. E-mail: info@asms.ru