

Оценка времени опроса аналоговых сигналов при диагностике средств железнодорожной автоматике и телемеханики



Петр БЕСТЕМЬЯНОВ
Petr F.BESTEMIYANOV

Шухрат ЮЛДАШЕВ
Shukhrat M.YULDASHEV



Бестемьянов Петр Филимонович — доктор технических наук, профессор, директор Института транспортной техники и систем управления Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Юлдашев Шухрат Муратович — аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» МИИТ.

Контроль работоспособности объектов на железнодорожном транспорте предполагает использование систем, оснащенных самыми современными аппаратными и программными средствами. Изложены подходы к определению времени опроса аналоговых сигналов. Методика обеспечивает требуемую точность измерений, качество получаемой информации и достоверность контроля действующих значений.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, диагностика средств автоматике и телемеханики, частота опроса аналоговых сигналов, интерполяция величины, алгоритмы восстановления формы и значений измеряемых сигналов, методика определения времени опроса, точность измерения.

На сети железных дорог большинства стран эксплуатируются системы диагностики технического состояния средств автоматике и телемеханики, которые базируются на разных концептуальных подходах и алгоритмах функционирования. Поэтому актуальна задача модернизации аппаратной и программной частей подсистем контроля, используемых ради быстрого действия и достоверности процедур определения предотказных симптомов (значений).

Для оценки работоспособности объекта контроля необходимо иметь первичную информацию о состоянии его элементов, блоков и отдельных узлов. Формирование такой информации возможно с помощью специальных устройств — диагностических датчиков. Основное их назначение состоит в количественной оценке параметров контроля [1]. Под количественной оценкой качества диагностирования будем понимать точность измерения контролируемых величин.

Анализ различных задач контроля показал, что их решение можно подразделить на ряд последовательно выполняемых типовых операций по переработке измери-

тельной информации. К таким операциям относятся: фильтрация шумов, экстраполяция величины, компенсация динамической связи, выделение признака события и тому подобные, при этом, что весьма существенно, основной набор типовых операций в различных задачах контроля конечен [2].

Каждая выделенная типовая операция по переработке контрольной информации может быть реализована различными методами и, следовательно, своими вариантами алгоритмов. Такого рода варианты отличаются друг от друга точностью и временем выполнения операций, объемом памяти, занимаемой ими в микроконтроллере.

Одним из наиболее ответственных узлов систем диагностики, определяющим качество работы железнодорожной автоматики и телемеханики, является модуль аналогового контроля, осуществляющий преобразование аналоговой величины в соответствующий ей цифровой эквивалент. Самые точные варианты алгоритмов таких узлов обычно занимают большой объем памяти и имеют большее время выполнения.

Высокая частота опроса ведет к усложнению систем контроля и повышению загрузки вычислительной части микроконтроллера. Низкая частота опроса практически может свести к нулю результаты контроля, поскольку при этом невозможно проследить с достаточной точностью за изменением контролируемой величины.

ТОЧНОСТЬ ОГРАНИЧЕНА ОШИБКОЙ КВАНТОВАНИЯ

Процесс получения микроконтроллером информации о непрерывно изменяющихся величинах происходит дискретно во времени, поэтому возникает задача восстановления значений измеряемых величин в момент времени, не совпадающих с моментом замера. Такое восстановление обычно производится различными методами интерполяции. Точность его ограничена ошибкой квантования. Однако в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона точное восстановление возможно лишь когда аналоговый сигнал $x(t)$ имеет ограниченный спектр, в этом случае он может быть воспроизведен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой

больше удвоенной верхней частоты спектра сигнала f_c : $f > 2f_c$ [3].

Теорема Котельникова утверждает, что непрерывный сигнал $x(t)$ можно представить в виде интерполяционного ряда [4]

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta) \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{\Delta(t-k\Delta)} \right]. \quad (1)$$

Интервал дискретизации удовлетворяет ограничениям $0 < \Delta \leq (1/2f_c)$. Мгновенные значения данного ряда есть дискретные отсчеты сигнала $x(k\Delta)$.

Этот путь расчета периода опроса достаточно громоздок и требует больших вычислительных ресурсов. Так, к примеру, в системе АДК-СЦБ [5] модуль аналогового ввода информации и преобразования сигналов датчика для определения величины напряжения в течение 40 мс производит 256 аналого-цифровых преобразований, что не может не повлиять на загрузку процессора за счет исполнения большого числа циклов.

Для решения задачи по оптимизации времени опроса и количества измерений за период была использована методика, которая предложена в [1].

Заданную точность определения величины опроса аналого-цифровых преобразований целесообразно обеспечить без необходимости применения специальных сложных алгоритмов экстраполяции, то есть использовать ступенчатую экстраполяцию, которая не требует дополнительных вычислений. При этом существенно снижается загрузка вычислительной части обработки информации.

Оценка искомого периода опроса аналоговых систем предполагает расчет периода опроса при ступенчатой экстраполяции для каждой существенной измеряемой величины. Известна формула [1]

$$\sigma_{\Delta x \max}^2 = 2[K_x(0) - K_x(t_0)] + \sigma_{\Delta x}^2, \quad (2)$$

которая определяет период опроса t_0 аналого-цифровых преобразований величины $x(t)$ в указанных условиях по заданной погрешности $\sigma_{\Delta x \max}^2$, известной погрешности датчика $\sigma_{\Delta x}^2$ и вычисленной оценке корреляционной функции измеряемого процесса $K_x(\tau)$. Такой путь расчета достаточно громоздок (требует предварительного вычисления оценок корреляционных функций измеряемых величин).



Номер строки	Время	Значение измеряемой величины	Отклонения величины за время			
			h_b		$2h_b$	
			1	2	3	4
0	0	x_0	-	-	-	-
1	h_b	x_1	Δ_{10}	Δ_{10}^2	-	-
2	$2h_b$	x_2	Δ_{21}	Δ_{21}^2	Δ_{20}	Δ_{20}^2
3	$3h_b$	x_3	Δ_{32}	Δ_{32}^2	Δ_{31}	Δ_{31}^2
4	$4h_b$	x_4	Δ_{43}	Δ_{43}^2	Δ_{42}	Δ_{42}^2
...
n-1	$(n-1)h_b$	$x_{(n-1)}$	$\Delta_{(n-1)(n-2)}$	$\Delta_{(n-1)(n-2)}^2$	$\Delta_{(n-1)(n-3)}$	$\Delta_{(n-1)(n-3)}^2$
n	nh_b	x_n	$\Delta_{n(n-1)}$	$\Delta_{n(n-1)}^2$	$\Delta_{n(n-2)}$	$\Delta_{n(n-2)}^2$
Оценки среднеквадратичных отклонений			σ_{1hb}^*		σ_{2hb}^*	

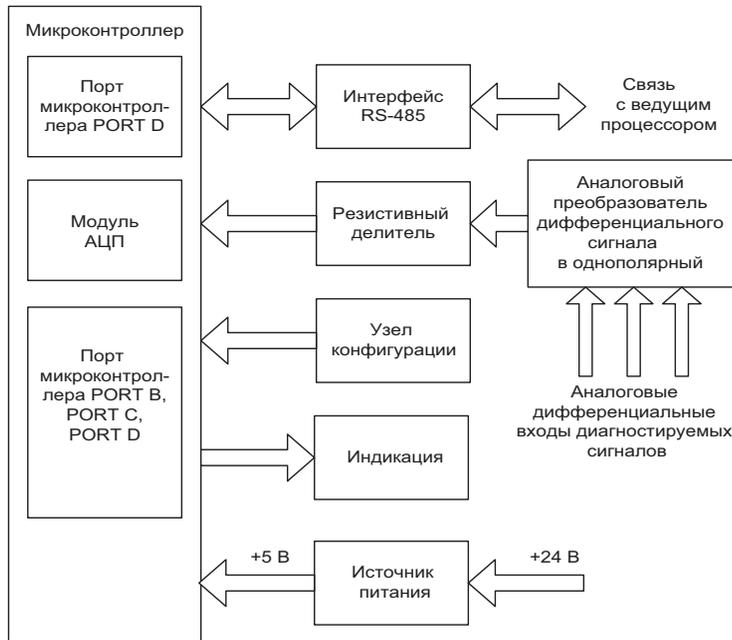


Рис. 1. Модуль аналого-цифрового преобразования.

Используем более простую приближенную оценку необходимого периода опроса аналого-цифровых преобразований величины $x(t)$ [1].

Пусть задана средняя квадратичная погрешность $\sigma_{\Delta x \max}$ определения величины $x(t)$. То есть учитываются случайная составляющая погрешности датчика и погрешности ступенчатой экстраполяции. В этих условиях нужно найти интервал времени между соседними замерами, при котором погрешность определения величины не превышала бы заданного значения.

Для предварительного расчета интервала был произведен опыт, заключающийся в 30–50-кратном измерении величины с любым произвольным интервалом вре-

мени между соседними замерами h_b . Полученные данные сводились в таблице 1, где над ними выполнялись указанные в ней действия.

В таблице введены следующие обозначения:

$$\Delta_{i(i-k)} = x_i^* - x_{i-k}^* ; \tag{3}$$

$$x_i^* = x_i^*(t_i), \quad x_{i-k}^* = x_i^*(t_{i-k}) ; \tag{4}$$

$$\sigma_{kh_b}^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^n \Delta_{i(i-k)}^2}{n-k}} , \tag{5}$$

где i – номер строки; k – номер столбца.

С помощью таблицы определяются приближенные оценки средних квадратичных отклонений величины за интервалы времени, кратные h_b . Для выявления ин-

Таблица 2

Частота гармоники, Гц	150	250	350	450	550	650
Содержание нечетной гармоники, %	18	7	3,6	2,4	1,65	1,2

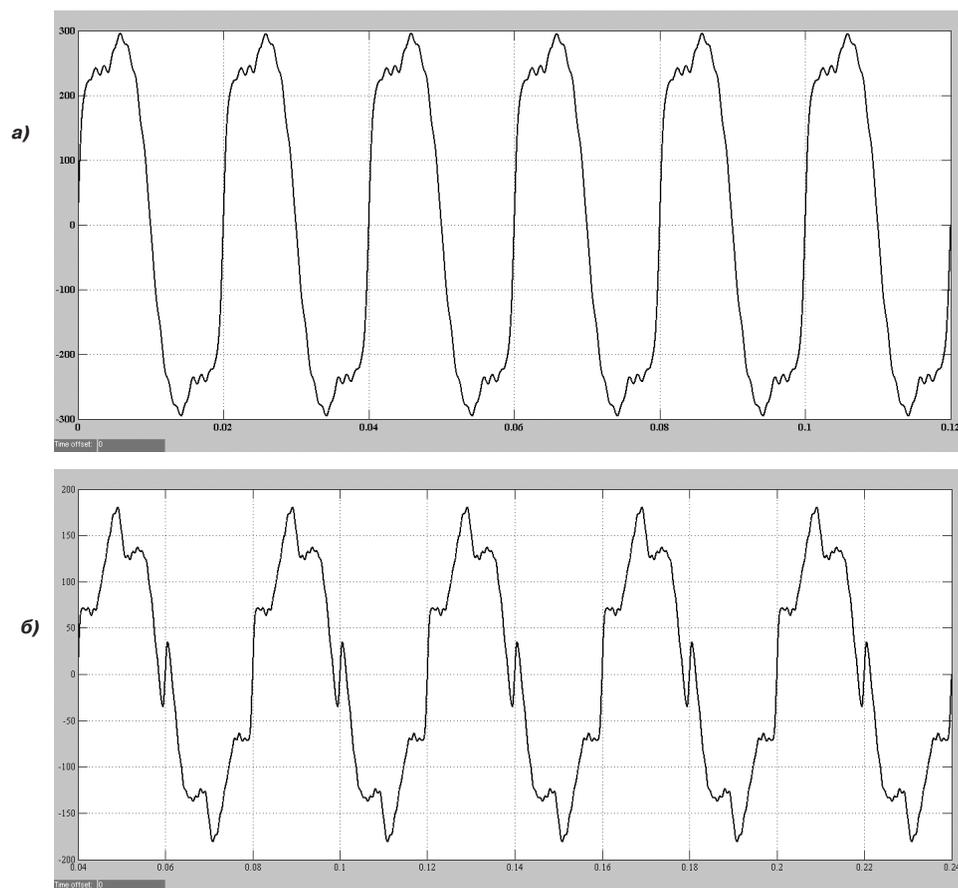


Рис. 2. Осциллограмма напряжения питания РЦ с гармоническими помехами: а) с частотой 50 Гц, 220 В; б) с частотой 25 Гц, 110 В.

тервала между соседними замерами целесообразно нанести на график $\sigma = f(h_p)$ полученные точки, соединив их плавной кривой. Все точки кривых, за исключением точки при $t=0$, наносятся по табличным данным.

Подобная методика применена к определению формы и качества аналогового сигнала на питающем конце фазочувствительной рельсовой цепи частотой 25 Гц напряжением 110 В и частотой 50 Гц напряжением 220 В. Модуль аналого-цифрового преобразования системы контроля построен на базе микроконтроллера Atmel AVR, структура модуля представлена на рис. 1.

Для измерения действующего значения напряжения аналогового сигнала в модуле существует 8-канальный узел аналого-циф-

рового преобразователя (АЦП). Модуль АЦП обеспечивает по методу последовательного приближения преобразование аналогового входного сигнала в соответствующий 10-разрядный цифровой код. опорное напряжение +5 В на дополнительном входе АЦП задает диапазон измерения. Входной аналоговый сигнал через коммутатор каналов поступает на схему выборки-хранения, где запоминается на время, необходимое для преобразования в 10-разрядный код.

Связь микроконтроллера с управляющим процессором обеспечивается через интерфейс RS-485 со скоростью 9600 Бод. Устройство питания представляет собой стабилизированный преобразователь постоянного напряжения 24 В, которое ис-





40

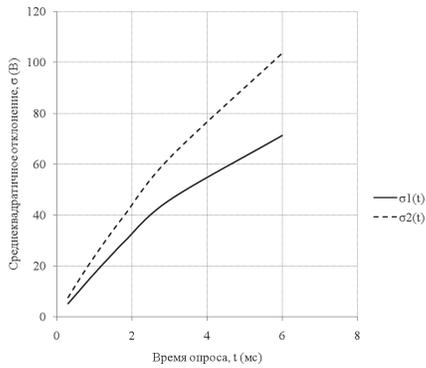


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении формы контролируемого сигнала напряжением 110 В и частотой 25 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех.

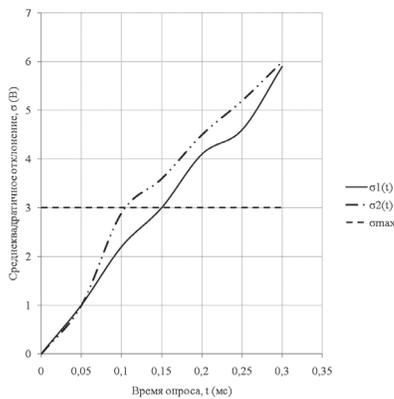


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении формы контролируемого сигнала напряжением 110 В и частотой 25 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех, σ_{\max} – максимально допустимое отклонение.

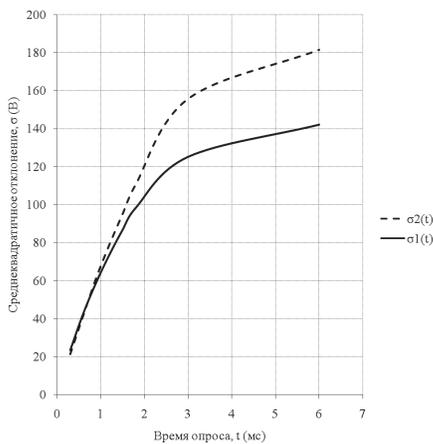


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении формы контролируемого сигнала напряжением 220 В и частотой 50 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех.

пользуется на посту ЭЦ, в постоянное напряжение 5 В.

Входное контролируемое напряжение питания рельсовых цепей через резистивный делитель подается на аналоговый вход микроконтроллера. Тот вводит мгновенные отчеты напряжения. По ним производятся:

- восстановление формы и значения измеряемых сигналов;
- определение действующего значения аналогового сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Испытания проводились для контрольных синусоидальных сигналов разных частот, а также сигналов с воздействием аддитивных гармонических помех. Согласно [7], источником гармонических помех в рельсовых цепях являются тяговые сети переменного тока. Наибольшее процентное содержание нечетных гармоник показано в таблице 2. На рис. 2 приведена осциллограмма моделированного сигнала с гармоническими помехами на питающем конце рельсовой цепи (РЦ).

На рис. 3 представлены результаты эксперимента в виде зависимости оценки времени опроса контролируемого электропитания рельсовых цепей переменного тока частотой 25 Гц и напряжением 110 В. Контролируемый аналоговый сигнал измерялся с помощью модуля АЦП с разными значениями времени опроса – от 0,3 до 6 мс. По этому графику можно определить максимальное значение времени опроса для величины σ_{\max} – допустимого среднеквадратичного отклонения напряжения питания. Согласно [6], среднеквадратичное отклонение измерительных приборов железнодорожной автоматики и телемеханики не должно превышать 2%. В нашем случае максимальное среднеквадратичное отклонение – $\sigma_{\max} \leq 3$ В.

При проведении опытов была получена кривая $\sigma_1(t)$, которая отражает изменение среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta x}$ измерения напряжения от времени опроса t_0 при идеальной форме сигнала, и кривая $\sigma_2(t)$, которая фиксирует изменение среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta x}$ измерения напряжения от времени опроса t_0 при наложении гармонических помех. При этом между соседними замерами существует значительная связь и среднеквадратичное

точное отклонение растет от значения σ_0 ($t_0=3$ мс) до постоянного ($t_0 \rightarrow \infty$) значения. Оценка необходимого периода опроса t_0 производится в пределах от σ_0 до σ_{\max} . Из кривых видно, что максимально допустимое среднеквадратичное отклонение не входит в данный диапазон измерения. Далее было уменьшено время между итерациями измерения модуля АЦП.

После введения изменений времени между итерациями получены новые данные о значении кривой $\sigma_1(t)$ при идеальной форме сигнала, а также значении кривой $\sigma_2(t)$ при наложении гармонических помех (рис. 4).

Из рисунка следует, что при времени опроса $t_0 = 0,15$ мс имеем максимально допустимое среднее квадратичное отклонение. Однако на практике напряжение с идеальной синусоидой не существует, ибо на нее накладываются гармонические помехи. Из кривой $\sigma_2(t)$ видно, что при времени опроса $t_0 = 0,1$ мс получается максимально допустимое среднее квадратичное отклонение.

Аналогичным образом проведены опыты при напряжении питания переменным током 220 В и частотой 50 Гц, в результате которых были получены зависимости, приведенные на рис. 5 и 6.

Из рис. 6 следует, что величина σ_{\max} соответствует случаю, когда допустимое среднеквадратичное отклонение определения напряжения питания от времени опроса имеет максимальное значение. Согласно [6], такое отклонение при измерении напряжения питания 220 В с частотой 50 Гц допускает предел $\sigma_{\max} \leq 6,2$ В.

При проведении опытов получены также кривые $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$. Из кривой $\sigma_1(t)$ видно, что времени опроса аналого-цифровых преобразований $t_0 = 1,2$ мс соответствует максимально допустимое среднеквадратичное отклонение при идеальной синусоиде. Наложение гармонических помех то же отклонение делает возможным за $t_0 = 0,05$ мс (кривая $\sigma_2(t)$).

Определение действующего значения контролируемого сигнала производится путем серии измерений их мгновенных (амплитудных) значений с последующим вычислением среднеквадратических величин [6]:

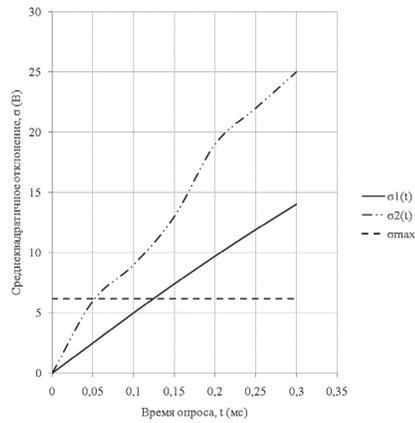


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении формы контролируемого сигнала напряжением 220 В и частотой 50 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех, σ_{\max} – максимально допустимое отклонение.

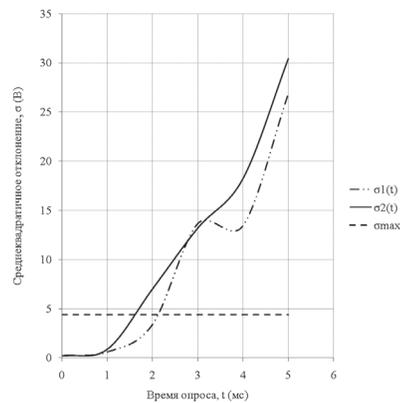


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении действующего значения контролируемого сигнала напряжением 220 В и частотой 50 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех, σ_{\max} – максимально допустимое отклонение.

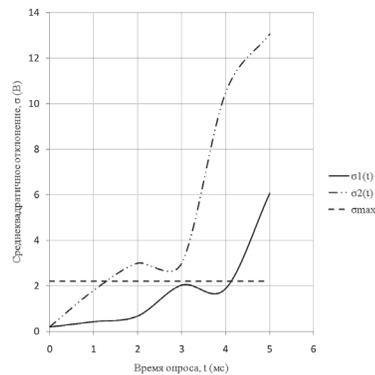


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени опроса при определении действующего значения контролируемого сигнала напряжением 110 В и частотой 25 Гц, где $\sigma_1(t)$ – идеальная форма сигнала; $\sigma_2(t)$ – сигнал при наложении гармонических помех, σ_{\max} – максимально допустимое отклонение.





$$X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}; \quad (6)$$

$$n = \frac{T}{\Delta t}. \quad (7)$$

Здесь n – количество точек опроса на интервале измерения; i – текущий номер измерения; T – период контролируемого сигнала; Δt – время опроса.

Для оценки среднеквадратичного отклонения действующего значения контролируемого сигнала по времени опроса были использованы вероятностные характеристики случайных процессов:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n-1}}. \quad (8)$$

На рис. 7 и 8 представлены результаты экспериментов в виде зависимости среднеквадратичного отклонения от времени опроса аналоговых сигналов при определении действующего значения напряжения питания переменным током частотой 25 Гц, 110 В и 50 Гц, 220 В.

Из рис. 7 следует, что величина σ_{\max} соответствует случаю, когда допустимое среднеквадратичное отклонение определения действующего значения напряжения питания от времени опроса имеет максимальное значение. Максимальное среднеквадратичное отклонение при напряжении питания 110 В с частотой 25 Гц не должно превышать 2,2 В [6]. В ходе опытов были получены кривые $\sigma_1(t)$ (при идеальной синусоиде напряжения питания) и $\sigma_2(t)$ (с наложением гармонических помех), которые отражают изменение среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta x}$ измерения напряжения от времени опроса t_0 . Кривая $\sigma_1(t)$ свидетельствует, что при времени опроса $t_0 = 4$ мс имеем максимально допустимое среднеквадратичное отклонение при идеальной синусоиде. Наложение гармонических помех то же отклонение делает возможным за 1,5 мс (кривая $\sigma_2(t)$).

Из рис. 8 видно, что величина σ_{\max} соответствует случаю, когда допустимое среднеквадратичное отклонение определения действующего значения напряжения питания от времени опроса имеет максимальное значение. Максимальное среднеквадратичное отклонение при напряжении питания 220 В с частотой 50 Гц не должно превышать

4,4 В [6]. В ходе опытов были получены кривые $\sigma_1(t)$ (при идеальной синусоиде напряжения питания) и $\sigma_2(t)$ (с наложением гармонических помех), которые отражают изменение среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta x}$ измерения напряжения от времени опроса t_0 . Согласно кривой $\sigma_1(t)$, при времени опроса $t_0 = 2$ мс наблюдается максимально допустимое среднеквадратичное отклонение (идеальная синусоида). При наложении гармонических помех то же отклонение имеем при времени опроса 1 мс (кривая $\sigma_2(t)$).

ВЫВОДЫ

Предложена методика определения времени опроса контролируемых аналоговых сигналов. Она обеспечивает требуемую точность измерений их качества формы и действующего значения.

При определении формы контролируемого сигнала напряжением 220 В и частотой 50 Гц необходимо производить измерения через каждые 0,05 мс, а при 110 В и 25 Гц – 0,1 мс. Для определения действующего значения аналогового сигнала напряжением 220 В и частотой 50 Гц измерения производятся через 1 мс, а при 110 В и 25 Гц – 1,5 мс, что на порядок больше, чем в известных устройствах. Это позволяет ослабить требования к аппаратным средствам диагностики систем автоматики и телемеханики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович Э.Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин. – М.: Энергия, 1975. – 417 с.
2. Ицкович Э.Л., Трахтенгерц Э.А. Алгоритмы централизованного контроля и управления производством. – М.: Советское радио, 1967. – 352 с.
3. Басараб М. А., Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф., Яковлев В. П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.
4. Панфилов И. П., Дырда В. Е. Теория электрической связи. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.
5. Федорчук А. Е., Сепетый А. А., Иванченко В. Н. Новые информационные технологии: автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СЦБ): Учебник для вузов. – Ростов: РГУПС, 2008. – 443 с.
6. Дмитренко И. Е., Устинский А. А., Цыганков В. И. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. 3-е изд., перераб. – М.: Транспорт, 1982. – 312 с.
7. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с. ●