

| Номер полупериода | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------------------|---|----|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|----|----|
| Значения ξ/ξ_1 | 1 | -2 | 1,91 | -1,81 | 1,72 | -1,64 | 1,56 | -1,48 | 1,41 | -1,34 | 1,28 | -0,64 | 0 | 0 |

Таким образом, в статье описан импульсный режим работы пьезопластины при односторонней ее нагрузке на воду. Исследование проведено с помощью метода Даламбера. Прослежена динамика изменения формы акустического сигнала при возбуждении преобразователя импульсами электрического напряжения специальной формы. Показана возможность получения необходимой длительности акустического сигнала при правильном подборе возбуждающего электрического импульса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (контракт № 13.G25.31.0054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А. С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов: Учеб пособие / ЛЭТИ. Л., 1996.
2. Transducer resolution enhancement by combining different excitation pulses / J. Salazar, A. Turo, J. A. Chavez et al. // Ultrasonics. 2000. 38, № 1 – 8. P. 145 – 150.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974.

S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko

TO THE QUESTION ON THE REDUCTION OF ACOUSTICAL PULSE DURATION OF THE TRANSDUCER EXCITED BY PULSES OF THE SPECIAL SHAPE

The pulse mode of operation of the piezoelectric transducer as a plate is considered. One side of the plate is loaded on the water medium, and another - on air. At carrying out of research method d'Alembert was used. On the basis of numerical-theoretical researches shapes of radiated acoustic pulses in water are defined at excitation of a plate by electric pulses of special shape. The opportunity of radiation of short acoustic signals is shown at excitation of the transducer by pulses of electric excitation of the special form

Piezoelectric transducer, principle d'Alembert, compensation, an acoustic pulse, an electric pulse

УДК 681.20; 547.47

Я. А. Бекенева, К. О. Комшилова, В. А. Комшилова

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Рассмотрен вопрос оценки динамической погрешности средств измерений на базе ПЛК. Приведены аналитические выражения для оценки динамической погрешности средств измерений на базе ПЛК. Приведен сравнительный анализ динамических характеристик систем на базе ПЛК для протоколов Modbus, Profibus и DeviceNet.

ПЛК, динамические ошибки средств измерений, Modbus, Profibus, DeviceNet

В течение последнего десятилетия развитие многих отраслей промышленности привело к возникновению компактных и удобных в использовании систем мониторинга и управления технологическими процессами. Важную роль в таких системах часто играют и средства измерений физических величин. От значения тех или иных величин подчас зависит выработка или отсутствие определенных управляющих сигналов, а также типы этих сигналов. Основные требования, предъявляемые к таким первичным измерительным

средствам, – небольшие размеры и высокая точность измерений [1]. Сигналы от датчиков поступают на входы программируемых логических модулей, которые обрабатывают данные и передают результаты конечному пользователю в ПК. При решении некоторых задач эти же модули могут выполнять только функцию измерения того или иного параметра.

При измерении физических величин с помощью программируемых логических контроллеров (ПЛК) нельзя обойти вниманием динамические характеристики используемых систем. В данной статье исследуются динамические характеристики средств измерения, построенных на базе ПЛК, а именно динамическая погрешность данных средств измерений.

Динамическая погрешность второго рода, обусловленная изменением значения измеряемого сигнала за время преобразования результатов измерения, определяется по формуле [1]:

$$\Delta_{\text{дин}} = M_1 T_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где M_1 – модуль-максимум производной сигнала; $T_{\text{пр}}$ – время преобразования и передачи данных, с. При этом M_1 должна удовлетворять условию [2]:

$$M_1 \leq 2\pi f_{\text{max}} \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2}, \quad (2)$$

где f_{max} – максимальная частота сигнала; X_{max} и X_{min} – максимальное и минимальное значения измеряемой величины.

Как видно из приведенных формул, значение погрешности прямо пропорционально времени, которое затрачивается на преобразование и передачу данных. Время передачи данных определяется характеристиками физического канала данных, а также протоколами, которые используются для передачи измерительной информации в ИИС. В данной статье рассматривается вопрос оценки динамической погрешности средств измерений, разработанных на базе ПЛК, с учетом как программных затрат на обработку данных, так и аппаратных, определяемых физическим каналом и протоколом передачи данных.

Период измеряемого сигнала и, как следствие, его частота зависят от быстродействия используемых контроллеров и длительности выполнения одного программного цикла, определяющей интервал квантования. Для ПЛК, обладающих невысоким быстродействием, это значение в среднем равно 10 мс. Согласно теореме Котельникова частота исследуемого сигнала при этом не может превышать 50 Гц [1].

Представляется целесообразным определить отношение максимального времени передачи данных к периоду исследуемого сигнала:

$$\delta_t = \frac{X}{v_{\text{prot}} T},$$

где δ_t – отношение максимального времени передачи данных к периоду сигнала, %; X – объем передаваемых данных, бит; v_{prot} – скорость передачи данных по исследуемому протоколу, бит/с; T – период сигнала, с. Значение отношения $\frac{X}{v_{\text{prot}} T}$ не должно превосходить 1.

Для синусоидального сигнала значение $\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ будет равно амплитуде сигнала.

Как видно из формул (1) и (2), динамическая погрешность в этом случае будет оцениваться по формуле

$$\Delta_{\text{дин}} = 2\pi fAT_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где A – амплитуда сигнала, В; f – частота сигнала, Гц.

Так как частота и период сигнала – взаимно обратные величины, то произведение частоты и времени обработки данных в формуле (3) будет равно отношению времени обработки к периоду сигнала, т. е. $\delta_t = \frac{T_{\text{пр}}}{T}$. Легко определить выражение для приведенной погрешности измерения (нормирующее значение – диапазон изменения сигнала – равно удвоенному значению амплитуды сигнала):

$$\gamma_{\text{дин}} = \frac{\Delta_{\text{дин}}}{2A} = \frac{2\pi fAT_{\text{пр}}}{2A} = \frac{2\pi AT_{\text{пр}}}{2AT} = \pi \delta_t. \quad (4)$$

Время обработки и передачи данных $T_{\text{пр}}$ определяется двумя составляющими: общим временем выполнения программного цикла на ПЛК $T_{\text{ц}}$ и временем передачи данных $T_{\text{д}}$, которое обусловлено используемым протоколом.

Время выполнения одного программного цикла определяется быстродействием данного ПЛК, а также алгоритмом обработки данных. Алгоритм обработки информации описывается в виде логических выражений (программы) на специально разработанном языке программирования, что в совокупности с мощными отладочными средствами определяет легкость ввода в эксплуатацию и дальнейшее обслуживание технических комплексов. Основным свойством ПЛК является циклический характер выполнения программы, поэтому время цикла $T_{\text{ц}}$ в значительной мере и определяет предел применимости данного типа устройств в системах реального времени.

Время выполнения программного цикла $T_{\text{ц}}$ включает в себя время, затрачиваемое ПЛК на считывание состояний входов и обновление выходов, а также время, необходимое для выполнения последовательности операций [1]. Общее время выполнения программного цикла определяется по формуле

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{вх}} + T_{\text{прог}} + T_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{вх}}$ – время считывания состояния входов ПЛК, с; $T_{\text{прог}}$ – время, затрачиваемое на выполнение операций, с; $T_{\text{вых}}$ – время, затрачиваемое на обновление выходов, с.

Время считывания состояния входов $T_{\text{вх}}$ и время обновления выходов $T_{\text{вых}}$ являются фиксированными для каждой модели ПЛК и прописываются в технической документации. Важно отметить, что в начале каждого программного цикла происходит одновременное считывание всех входов, в конце – одновременное обновление всех выходов. Следовательно, заранее известными для каждой программы являются две составляющие, которые постоянны для используемого модуля и не зависят от сложности выполняемой программы.

Основная проблема заключается в нахождении длительности выполнения команд программы. Для этого необходимо определить количество всех выполняемых операций программы: логических и арифметических (сложения и умножения).

В общем случае время выполнения программы ПЛК $T_{\text{прог}}$ определяется по формуле

$$T_{\text{прог}} = N \cdot K T_{\text{лог}} + \sum_i M_i T_{\text{слож}} W_i + \sum_j L_j T_{\text{умн}} W_j, \quad (6)$$

где N – количество циклов измеряемой длительности; K – количество логических операций; $T_{\text{лог}}$ – длительность выполнения одной логической операции, с; M_i – количество операций сложения над данными типа i ; $T_{\text{слож}}(W_i)$ – длительность выполнения одной операции сложения над данными типа i , с; L_j – количество операций умножения над данными типа j ; $T_{\text{умн}}(W_j)$ – длительность выполнения одной операции умножения над данными типа j , с.

Соответственно, время выполнения одного программного цикла $T_{\text{ц}}$, определенное в (5) с учетом (6), вычисляется по формуле

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{вх}} + N \cdot K T_{\text{лог}} + \sum_i M_i T_{\text{слож}} W_i + \sum_j L_j T_{\text{умн}} W_j + T_{\text{вых}}. \quad (7)$$

Как правило, техническая документация программируемых контроллеров располагает сведениями о длительности выполнения арифметико-логических операций для каждого типа данных [2]. Например, для программируемых контроллеров WAGO временные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Время выполнения, мкс | Размер данных, байт | |
|-----------------------|---------------------|----|
| | 1 | 2 |
| $T_{\text{вх}}$ | 50 | |
| $T_{\text{вых}}$ | 50 | |
| $T_{\text{лог}}$ | 3 | |
| $T_{\text{слож}}$ | 6 | 12 |
| $T_{\text{умн}}$ | 18 | 36 |

С другой стороны, как уже отмечалось, на динамические характеристики средств измерений, построенных на базе ПЛК, влияет время, затрачиваемое на передачу данных по каналам связи, которое зависит от используемых протоколов. В современных системах мониторинга при передаче данных от ПЛК на серверное приложение наиболее часто используются следующие протоколы: Modbus, Profibus и DeviceNet.

Тогда выражение (4) с учетом (7) будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{дин}} &= \pi \frac{T_{\text{ц}} + T_{\text{д}}}{T} = \\ &= \pi \frac{T_{\text{вх}} + N(K T_{\text{лог}} + \sum_i M_i T_{\text{слож}}(W_i) + \sum_j L_j T_{\text{умн}}(W_j)) + T_{\text{вых}} + T_{\text{д}}}{T}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для каждого из этих протоколов определим динамическую погрешность измерения сигнала синусоидальной формы частотой 50 Гц при разных значениях объема передаваемых данных.

Для получения оценки динамической погрешности зададимся алгоритмом обработки данных. Пусть он включает в себя 5 операций сложения, 6 операций умножения и две ло-

гические операции. Все арифметические операции выполняются над байтами, словами и двойными словами. Таким образом, для заданных условий имеем: $K = 2$, $M = 3$, $L = 4$.

Наиболее распространенным и востребованным на сегодняшний день протоколом, применяемым в промышленных сетях, является протокол *Modbus* — коммуникационный протокол, основанный на клиент-серверной архитектуре [3]. Его достоинства — это простота реализации, наличие большого числа уже готовых решений для различных задач систем автоматизации, удобный интерфейс. Протокол Modbus использует для передачи данных последовательные интерфейсы RS-485, -422, -232, а также сети TCP/IP. В настоящее время поддерживается некоммерческой организацией Modbus-IDA.

Максимальная скорость передачи данных протокола Modbus составляет 19 200 бит/с [3]. Длительность операции запроса на чтение составляет в среднем 0,75 мс. Значения приведенной динамической погрешности (в процентах), вычисленные по формуле (8), для протокола Modbus представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Скорость передачи данных, бит/с | Объем данных, бит | | |
|---------------------------------|-------------------|-------|-------|
| | 8 | 16 | 32 |
| 19 200 | 9,67 | 17,62 | 33,54 |

Profibus (PROcess FIEld BUS) — это наиболее мощная сеть полевого уровня, которая может быть использована для большинства практических применений [3]. Эта сеть отвечает требованиям международных стандартов IEC 61158 и EN 50170. Скорость обмена данными по протоколу Profibus при длине кабеля 200 м составляет 1,5 Мбит/с, а при длине кабеля 100 м — 12 Мбит/с. Значения приведенной динамической погрешности (в процентах) для протокола Profibus представлены в табл. 3.

Таблица 3

| Скорость передачи данных, бит/с | Объем данных, бит | | |
|---------------------------------|-------------------|------|------|
| | 8 | 16 | 32 |
| 1,5 | 4,71 | 6,20 | 7,71 |
| 12 | 4,56 | 5,98 | 7,41 |

DeviceNet предназначен для объединения промышленных устройств в единую сеть с общей шиной [3]. Протокол DeviceNet работает на трех скоростях: 125 (при длине кабеля 500), 250 (при длине кабеля 250) и 500 (при длине кабеля 100) Кбит/с. Значения приведенной динамической погрешности (в процентах) для протокола DeviceNet представлены в табл. 4.

Таблица 4

| Скорость передачи данных, бит/с | Объем данных, бит | | |
|---------------------------------|-------------------|------|-------|
| | 8 | 16 | 32 |
| 150 | 6,96 | 9,59 | 12,22 |
| 250 | 6,29 | 8,59 | 10,88 |
| 500 | 5,79 | 7,83 | 9,88 |

Тенденция к полной автоматизации управления промышленными процессами не предполагает мгновенной передачи результатов измерения на системы индикации. Для таких измерительных средств не имеет большого значения динамическая погрешность каналов передачи данных измерительной информации пользователю, однако может существовать необходимость хранения полученных результатов. В этих системах могут быть использованы протоколы, обладающие невысокой скоростью передачи данных, например

протокол Modbus. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 2–4, показывает, что наименее эффективны с точки зрения динамической погрешности измерительные системы, использующие для передачи данных протокол ModBus. Так, в рассмотренном примере обработки измерительной информации с заданными количеством операций сложения и умножения и типом сигнала для 8-разрядных данных динамическая погрешность составит 9,67 %, в то время как использование протокола DeviceNet уменьшит значение данной погрешности почти в полтора раза – 6,79 % при скорости передачи 500 бит/с, а Profibus – в 2 раза: 4,56 % при скорости 12 Мбит/с.

Представленные формулы наиболее полно отображают все составляющие динамической погрешности измерения для систем промышленной автоматики. При проектировании измерительных систем и вычислении динамической погрешности следует внимательно отнестись к определению всех факторов, влияющих на быстродействие системы, что позволит получить наиболее точное значение динамической погрешности. Определив все составляющие динамической погрешности, можно легко скорректировать разрабатываемую систему выбором наиболее высокоскоростных протоколов связи или модулей, обладающих более высоким быстродействием, а также оптимизировав алгоритм обработки данных. Так же может быть решена проблема превышения реальной динамической погрешностью системы допустимого значения.

Все проведенные исследования показали, что в промышленных системах управления медленно протекающими процессами системы управления, основанные на программируемых логических модулях, могут успешно выполнять функции измерения параметров процесса (таких, как например, температура, влажность, концентрация вещества, уровень задымленности).

Использование программируемых логических контроллеров в качестве измерительного средства в таких системах экономически обусловлено тем, что ПЛК способны осуществлять не только функции управления, но и выполнять как логические, так и сложные математические операции. Таким образом, не требуется наличие отдельных средств, решающих только измерительные задачи. Стоимость ПЛК обычно невысока, и в режиме эксплуатации не требуются большие энергетические затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Для студентов вузов/ Сост.: Б. Я. Авдеев, В. В. Алексеев, Е. М. Антонюк и др. М.: Издательский центр «Академия», 2007.
2. Парр Э. Программируемые контроллеры. Руководство для инженера. М.: Бином, 2007.
3. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Сетевые операционные системы: Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2003.

Y. A. Bekeneva, K. O. Komshilova, V. A. Komshilova

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MEASUREMENTS SYSTEMS BASED ON INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS

The estimate of dynamic error of measurements systems based on PLC is discussed. The analytic expressions for dynamic error estimations of measurements systems based on PLC are provided. The comparative analysis of the dynamic characteristics of systems based on PLC for protocols Modbus, Profibus and DeviceNet.

PLC, dynamic errors of measurements systems, Modbus, Profibus, DeviceNet