

## СИНТЕЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Чан Шинь Биен, аспирант;  
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет  
До Дык Лыу, к.т.н.  
Государственная Морская Академия им. адм. С.О. Макарова

Выполнен анализ возможностей аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на технологии преобразования напряжения в частоту (ПНЧ) для построения измерительных каналов систем автоматического контроля и диагностирования (САКД) судовых дизелей по виброакустическим сигналам (ВАС). Для САКД судовых ДВС синтезируется многоканальный АЦП, который состоит из многоканального нормирующего устройства, ПНЧ и цифровых фильтров. Предложена блок-схема АЦП для измерения ВАС с современными методами передачи сигналов (методы оптической, антенной передачи и др.).

В настоящей статье приведены результаты исследований характеристик измерительных каналов САКД для их усовершенствования на основе использования новых технологий электроники.

В работе [1] предложена система автоматического контроля и диагностирования (САКД). Аппаратная часть этой системы состоит из блока датчиков, измерительных каналов (ИК) и центра обработки данных и индикации (ЦОДИ) результатов контроля и диагностирования. Датчики виброакустических сигналов для цели диагностирования характеризуются рядом особенностей: быстрейшим, точностью, диапазоном изменения и видом выходных электрических сигналов (аналоговый или цифровой). ЦОДИ состоит из блоков вычисления и индикации. Вычислительный блок обрабатывает входную информацию и передает результаты обработки поставленных задач контроля, диагностирования и прогнозирования блоку индикации. Входы ЦОДИ являются цифровыми и характеризуются быстрейшим, размером многоканальных и стандартных сигналов. Задача ИК — преобразование аналоговых сигналов в цифровые и передача последних в ЦОДИ.

Если в измерительных системах используются традиционные многоканальные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), то характеристики их измерительных каналов определяются характеристиками (быстрейшим, точностью и

надежностью), зависящими от операций: квантование измерительной величины по уровню; дискретизация их по времени и кодирование информации [3].

Технология аналого-цифрового преобразования косвенного типа на основе технологии преобразования «напряжение в частоту» (ПНЧ) выполняется в два этапа. На первом этапе осуществлено преобразование напряжения в частоту с линейной характеристикой между напряжением  $u$  и частотой  $f$ . На втором этапе осуществляется преобразование «частота-код» путем подсчета импульсов за фиксированный интервал времени, которое представляется усреднением с помощью счетчиков.

На практике преобразователь «напряжение в частоту» (ПНЧ) используется совместно с фильтром. Следовательно, он применим для измерения случайных сигналов. ПНЧ преобразует входное напряжение в частоту, т. е. его выходные сигналы — импульсы, которые могут передаваться на большие расстояния без искажения входного информационного параметра. По информации фирм-производителей АЦП, например [4], ПНЧ на мировом рынке по своим ценам сравнительно доступны для широкого круга разработчиков.

Судовые дизели и центральный пост управления в машинном отделении удалены друг от друга. Поэтому если на выходе датчика аналоговый сигнал, то целесообразно использовать ПНЧ. Эффективность применения ПНЧ в сравнении с традиционным АЦП характеризуется удобством и экономичностью.

В настоящее время ПНЧ применяется совместно с простейшим усредняющим фильтром типа «скользящее среднее». Для повышения точности преобразования могут применяться различные цифровые фильтры. Сравним следующие варианты:

- использование счетчика (Sinc-фильтра первого порядка) — традиционный метод [2]. Максимальная среднеквадратическая погрешность (СКП) не зависит от величины входного сигнала;
- использование цифрового фильтра — новый предлагаемый метод. В этом случае весовая функция фильтра имеет трапецеидальную фор-

му. Анализ выполненного авторами численного моделирования показывает, что максимальные СКП при квантовании зависят от величины входного сигнала, и они смещены к границам измеряемого диапазона, а минимальная величина СКП — к середине измеряемого диапазона сигнала. Максимальная величина СКП в данном случае меньше максимального значения СКП в первом варианте. Анализ показывает, что наилучший результат достигается, когда отношение нижнего основания трапеции к верхнему основанию равно 2,6. Цифровой фильтр, определенный трапецеидальной весовой функцией (назовем его *T*-фильтром) нетрудно реализуется аппаратно или программно. Поэтому в качестве блока цифровых фильтров целесообразно использовать микроконтроллер или цифровой процессор.

Микросхема ПНЧ AD652KP/BQ фирмы Analog Devices имеет малую погрешность линейности (максимальная погрешность линейности — 0,02 % при тактовой частоте 4 МГц). Для ПНЧ AD652 время преобразования  $T_{\text{ПРЕОБ.1}}$  (для Sinc-фильтра) определено по формуле:  $T_{\text{ПРЕОБ.1}} = (f_{\text{CLK}}/2N)^{-1}$ , где  $N$  — разрешение АЦП [4].

Если используется *T*-фильтр вместо Sinc-фильтра, то полученное время преобразования  $T_{\text{ПРЕОБ.2}}$  получено  $T_{\text{ПРЕОБ.2}} \approx 0,6 T_{\text{ПРЕОБ.1}}$ .

В табл. 1 показаны расчетные значения времени преобразования при использовании обычного счетчика (Sinc-фильтр,  $T_{\text{ПРЕОБ.1}}$ ) и *T*-фильтра ( $T_{\text{ПРЕОБ.2}}$ ) в зависимости от разрядности АЦП для ПНЧ — AD652KP/BQ.

В табл. 1, погрешность целой шкалы квантования  $\delta_{\text{шк}}$  при разрядности  $b$  бит определяется формулой  $\delta_{\text{шк}} = 1/2^b$ , например, если  $b = 8$  бит, то  $\delta_{\text{шк}} = 1/256 \approx 0,39\%$ .

По рекомендации фирмы-производителя [4]  $U_{\text{max}} = f_{\text{CLK}}/2 = 2MНз$ , где  $U$  — выход АЦП.

Если  $k_{\text{инт}} = x_{\text{max}}/x_{\text{min}}$ , где  $x$  — вход АЦП, то точность квантования  $\delta_{\text{к}} = k_{\text{инт}} d_{\text{шк}}$ .

Датчики виброакустических сигналов, применяемые для диагностирования судовых ДВС [1]:

- Д1 — для измерения положения верхней мертвой точки (ВМТ) первого цилиндра;
- Д2 — для измерения общего крутящего момента (ОКМ) или частоты вращения вала (ЧВКВ);
- Д3 — для измерения давления газа в камере сгорания (индикаторная диаграмма, ИД);
- Д4 — для измерения давления топлива в трубопроводе между насосом и форсункой (этот датчик можно заменить датчиком вибрации форсунки);
- Д5 — для измерения вибрационных ускорений регистрации фазы газораспределения.

Среди вышеуказанных быстро изменяющихся сигналов измерению крутильных колебаний с помощью Д2 уделено особое внимание. Диагностические признаки могут быть представлены характеристиками в частотной или временной области крутильных колебаний. Если частота вращения дизеля  $n$ , об/мин, или  $f_d = n / 60$ , Гц, то признаки определены на частотах:  $f = M \cdot f_d$ , где  $M$  — число гармоник, используемые в диагностике, обычно  $M = 30$ . Разрешимость дискретизации измеренных сигналов  $f^* \geq 2 M \cdot f_d$  (по теории Котельникова).

Если диагностирование судовых дизелей выполнено по максимальным или минимальным значениям крутильных колебаний, то должны обрабатываться селективные данные крутильных колебаний в соответствии с фазами сгорания в цилиндрах. Данные на каждой фазе рабочего процесса цилиндра измеряются на сравнительно большом числе точек ( $n_{\text{ц}}$ ). Одна дискретизация осуществлена по углу вращения коленчатого вала между 0,3–0,5 градусам. В этом случае для двухтактного двигателя с  $z$  цилиндров, за один цикл (1 оборота вращения коленчатого вала) измеряются крутильные колебания в  $N_{\text{ц}}$  точках (порядка 1000 точек),  $N_{\text{ц}} = z \cdot n_{\text{ц}}$ . Разрешимость

Таблица 1

**Время преобразования и погрешность квантования АЦП на основе ПНЧ (AD652KP/BQ) при использовании Sinc-фильтра и *T*-фильтра**

Характеристики				Sinc-фильтр	<i>T</i> -фильтр
Разрядность, $b$ , бит	Разрешение $N = 2b$	Тактовая частота, МГц	Погрешность квантования, %	Время преобразования $T_{\text{ПРЕОБ.1}}$ , мс	Время преобразования $T_{\text{ПРЕОБ.2}}$ , мс
8	256	4	0,39	0,128	0,076
10	1024	4	0,098	0,512	0,305
12	4096	4	0,0244	2,048	1,219
14	16384	4	0,0061	8,190	4,880
16	65536	4	0,00153	32,770	19,510

дискретизации измеренных сигналов должна выбираться из неравенства:  $f^* \geq n \cdot N_{\text{д}}$ .

Другие методы поэлементного диагностирования судовых дизелей, например, вейвлет-анализ виброакустических сигналов, обосновывают подобную необходимую высокую разрешимость ИК как и в случае диагностики по временной характеристике крутильных колебаний валопровода. Для диагностирования дефектов узла некоторого диагностируемого цилиндра селективные данные в соответственной фазе его работы подвергаются преобразованиям Фурье.

Для виброакустической диагностики разрешимость ИК определяется условием:  $f^* \geq 1024 \cdot n_s$ , где  $n_s$  [с<sup>-1</sup>], или  $f^* \geq 17,1 \cdot n$ ,  $n$  [об/мин], где  $n = 60 \cdot n_s$ .

Для современных судовых ДВС рассматривается диапазон частот вращения от  $n_{\text{min}} = 40$  об/мин (для малообработанных дизелей) до  $n_{\text{max}} = 1800$  об/мин (для высокооборотных дизелей).

Быстродействие выбранного АЦП должно быть больше некоторого значения  $f^*$  для диагностируемого дизеля.

В табл. 2 показаны необходимые данные примерного расчета о дискретизации для диагностирования судовых дизелей по крутильным колебаниям.

Данные в табл. 1 и 2 показывают хорошие возможности (по характеристике времени преобразования или быстродействия АЦП) ПНЧ AD652KP/BQ для построения одноканального АЦП в ИК системы автоматического контроля и диагностирования судовых дизелей по крутильным колебаниям. При диагностировании по частотным характеристикам крутильных колебаний самая высокая частота при  $M = 30$  — это  $f_{\text{max}} = 30 \cdot 1800/60 = 900$  Гц. Следовательно,  $f^* > 2f_{\text{max}} = 1,8$  КГц. Это условие обеспечивается быстродействием AD652KP/BQ,  $f_{\text{CLK}} = 4$  МГц, и также при диагностировании по временным характеристикам, поскольку самое необходимое быстродействие при  $n = 1800$  об/мин — это 30,78 КГц.

Достаточно в этом смысле синтезируется 10-битный АЦП на основе ПНЧ AD652KP/BQ с Sinc-

фильтром первого порядка или  $T$ -фильтром, который обеспечивает точность шкала квантования 0,098 %. Кроме этого, при необходимости дополнительно может быть повышена точность путем регулирования коэффициентов блока нормирующего устройства (НУ).

*Синтез измерительных каналов САКД судовых дизелей.*

На рис. 1 показана структурная схема измерительных каналов на основе ПНЧ, состоящая из БД — блок датчиков (в данном случае используются пять датчиков виброакустических сигналов), НУ, ПНЧ, ЦФ — блок цифровых фильтров и ЦОДИ. Группа блоков НУ ПНЧ и ЦФ представляет собой модификацию АЦП на основе технологии ПНЧ.

Могут быть выбраны следующие каналы для построения САКД судовых дизелей:

> канал 1 — для измерения ВМТ первого цилиндра. Если используется датчик с аналоговым выходным сигналом, то выбирается группа блоков НУ-ПНЧ-ЦФ. В случае, если выходной сигнал датчика — цифровой, то он прямо поступает к ЦФ;

> канал 3, 4 и 5 — измерений давления газов в цилиндре, давления топлива в трубопроводе между топливным насосом высокого давления и форсункой и регистрации газораспределения цилиндров соответственно. Выходные сигналы из датчиков являются аналоговыми и однополярными. Следовательно каналы АЦП синтезируются группами блоков НУ-ПНЧ-ЦФ — выходной сигнал датчика для измерения текущего крутящего момента двигателя представляется аналоговым и двухполярным. Следовательно, этот канал группы блоков НУ-ПНЧ-ЦФ ис-



Рис. 1. Структурная схема измерительной системы на основе ПНЧ

Таблица 2

**Необходимое быстродействие АЦП измерительного канала в САКД для диагностирования судовых ДВС по крутильным колебаниям**

n, об/мин	f* = 17,1 · n, Гц	n <sub>ц</sub> = (1024/mz), (целое число от 1024/mz), m = 1 для 2-тактных; m = 0,5 для 4-тактных ДВС		
		z = 5	z = 7	z = 9
40	684	205	146	114
400	6840	410	293	228
1000	17100	410	293	228
1800	30780	410	293	228

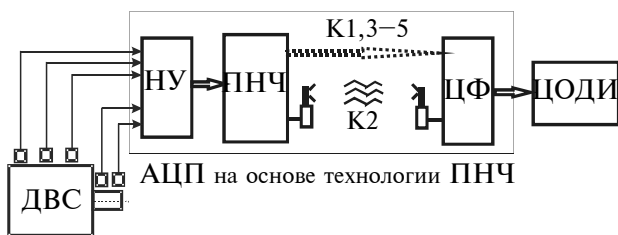


Рис. 2. Блок-схема системы автоматического контроля и диагностирования судовых дизелей на основе технологии преобразования напряжения в частоту

пользуется ПНЧ с дифференциальными входами.

Если используется датчик мгновенной ЧВКВ вместо датчика текущего момента двигателя, то АЦП синтезируется ПНЧ по однополярному входу. В общем, необходимо выбрать пятиканальный АЦП для построения САКД судовых дизелей. ПНЧ AD652KP/BQ представляет собой одноканальный преобразователь, следовательно, должно использоваться 5 микросхем. Лучше используется ПНЧ AD7742 [4], который имеет двух- дифференциальный или четырех- однополярный канал. В этом случае для удобства используются две микросхемы ПНЧ AD7742. ПНЧ применяется в измерительных каналах с гальваническим разделением (с использованием оптрона, трансформатора, беспроводной связи, оптического волокна) [5].

Большинство микросхем ПНЧ могут быть использованы для обратного преобразования «частота–напряжение» (ПЧН). Выходное напряжение ПЧН пропорционально среднему значению частоты входного сигнала.

Каналы 1, 3–5 (К1, 3–5) целесообразно применять с гальваническим разделением оптического волокна, канал 2 (К2) — для измерения текущего крутящего момента двигателя или для измерения мгновенной частоты вращения коленчатого вала с оптической передачей измеренного сигнала.

Таким образом, авторами обоснована и предложена новая блок-схема САКД (рис. 2), в которой формируется канал для измерения текущего крутящего момента двигателя.

#### Литература

1. До Дык Лыу. Построение системы автоматического контроля и диагностики судовых дизелей по общему двигательному моменту и закону движения коленчатого вала // Сб. тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. — СПб., 2006. — С. 183 — 191.
2. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 192 с.
3. Алиев Т. М, Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника. — М.: Высшая школа, 1991. — 384 с.
4. Analog Devices Inc. Data Sheets, www.analog.com.
5. National Semiconductor Inc. Data Sheets, www.national.com.

ЮБИЛЕЙ !

## ВИКТОРУ ВАЛЕНТИНОВИЧУ АЛЬТУ 60 ЛЕТ

*22 марта 2006 года исполнилось 60 лет Альту Виктору Валентиновичу, д.т.н., профессору, директору Сибирского физико-технического института аграрных проблем Сибирского отделения Россельхозакадемии (СибФТИ СО РАСХН), члену редколлегии журнала «Двигателестроение»*

*Основная направленность профессиональной и научной деятельности Виктора Валентиновича Альта начала формироваться в Сибирском институте механизации и электрификации сельского хозяйства, куда он был направлен на работу после окончания Новосибирского электротехнического института.*

*Его научные и организаторские способности полностью раскрылись после перехода в СибФТИ СО РАСХН, который он возглавляет в настоящее время. Совмещая административную работу с научной и преподавательской деятельностью, Виктор Валентинович Альт стал профессором НТГУ, а также членом специализированных советов по защите докторских диссертаций в СибИИЭ и НТГУ. Работы по технической диагностике рабочих процессов ДВС завершили созданием более 30 диагностических комплексов и систем, внедренных на двигателестроительных заводах Санкт-Петербурга, Барнаула, Владимира, Ярославля, Тюльятти и многих других.*

*Виктор Валентинович Альт опубликовал более 130 научных работ, под его руководством выполнено более 40 опытно-конструкторских разработок, защищены диссертации. Его успехи отмечены Государственными наградами: орденом Почета, медалью «За доблестный труд», наградами общественных организаций.*

*Коллектив Сибирского физико-технического института аграрных проблем и редакция журнала «Двигателестроение» поздравляют Виктора Валентиновича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья и новых творческих успехов.*

