

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ЧУГУНА

С. Н. Семенович, И. П. Стецко, А. А. Чеплюков

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
E-mail: semenovich@bsu.by*

Предложены алгоритмическое и схемотехническое решения для аналого-цифрового преобразователя временных интервалов на основе цифрового микропроцессорного счетчика и аналогового интерполятора в качестве бюджетного решения для технологического устройства ультразвукового контроля структуры отливок из высокопрочного чугуна при их производстве.

Ключевые слова: *преобразователь временных интервалов, неразрушающий контроль структуры материалов, микропроцессорное устройство.*

Успешный опыт и практика применения ультразвуковых методов неразрушающего контроля для определения качества чугуна при производстве подтверждают устойчивость корреляционных взаимосвязей между акустическими свойствами и физико-механическими свойствами исследуемого материала [1]. Обычно для задач отбраковки отливок используют относительно дорогие измерительные средства – дефектоскопы, с помощью которых выполняют оценку скорости распространения и степени затухания продольных ультразвуковых колебаний в материале [1–3].

Предложенная схема преобразователя временных интервалов позволяет решить актуальную задачу создания бюджетного технологического индикаторного устройства, позволяющего осуществлять оперативный контроль отливок из чугуна для разбраковки при производстве или при входном контроле на предприятиях машиностроения.

В качестве основной измерительной схемы принят теневой метод УЗ-дефектоскопии [3] – материал известной толщины (данные предварительных линейных измерений) располагается между излучателем и приемником и оценивается временной интервал, необходимый акустическому сигналу для преодоления расстояния между преобразователями. На основании исходных исследовательских данных о скорости звука для серого и высокопрочного чугуна тестируемые отливки могут быть классифицированы [2, 3].

Диапазон типичных глубин прозвучивания отливок – от 20 до 300 мм; скорость распространения волны – от 3000 до 5500 м/с; диапазон исследуемых интервалов от единиц – до сотни микросекунд; необходимое временное разрешение измерительной схемы – на уровне единиц нано-

секунд, при дискретности измерения линейных размеров на уровне 100 мкм [1-3].

Методы прецизионного измерения временных интервалов между двумя старт-стопными событиями (момент излучения/воздействия и момент оклика/приема сигнала) хорошо известны и находят свое применение в измерительной технике (частотомеры, вольтметры), в научных исследованиях с использованием импульсных радиосигналов, лазерного излучения, при вибродиагностике и в других задачах.

В решаемой задаче точность и дискретность измерения времени распространения упругой волны являются определяющими параметрами для идентификации структуры материала [3]. Для обеспечения требуемой дискретности измерения на достаточно больших временных интервалах схемотехнические решения устройств, регистрирующих время распространения упругой волны, как правило, используют многоразрядные синхронные счетчики на основе скоростных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Однако для бюджетного технологического индикаторного прибора целесообразно реализовать функцию преобразователя временных интервалов на основе микропроцессора, совмещающего функции управления процессами измерения, расчета и индикации результата. Используя высокостабильный тактовый генератор и встроенный многоразрядный цифровой счетчик можно легко реализовать метод заполнения – подсчет количества эталонных импульсов в диапазоне старт-стопного интервала. Такой способ достаточно прост в реализации, но обладает существенным недостатком – относительная погрешность измерения интервала  $\delta_{\text{И}}$  зависит от трех компонент:

$$\delta_{\text{И}} = \pm(\delta_{\text{ТГ}} + \delta_{\text{N}} + \delta_{\text{д}}),$$

где  $\delta_{\text{ТГ}}$  – относительная погрешность тактового генератора,  $\delta_{\text{N}}$  – относительная погрешность дискретности счета (зависит от количества счетных импульсов заполнивших интервал),  $\delta_{\text{д}}$  – погрешность дискриминатора (фазовая ошибка компаратора уровня).

Превалирующий вклад создает компонента  $\delta_{\text{N}}$ , связанная с аппаратным ограничением по максимальной тактовой частоте используемого микропроцессора, так как стабильность кварцевого генератора достаточно высока ( $\pm 0,01\%$ ), а погрешность дискриминатора для импульсных старт-стопных сигналов относительно мала ( $\pm 0,01\%$ , пределы фазовой ошибки  $\sim \pm 100$  пс) даже для минимально возможного интервала в 1 мкс.

Предложенный в работе способ позволяет снизить требование к максимальной частоте тактирования и обеспечить высокое разрешение преобразователя за счет использования дополнительной схемы аналогового интерполятора / расширителя интервала «А» (см. рисунок 1) между сто-

повым сигналом и ближайшим импульсом тактовой серии, и микропроцессорного счетчика заполнения для измерения расширенного интервала.

На рисунке 1 приведена структурно-функциональная схема разработанного преобразователя временных интервалов.

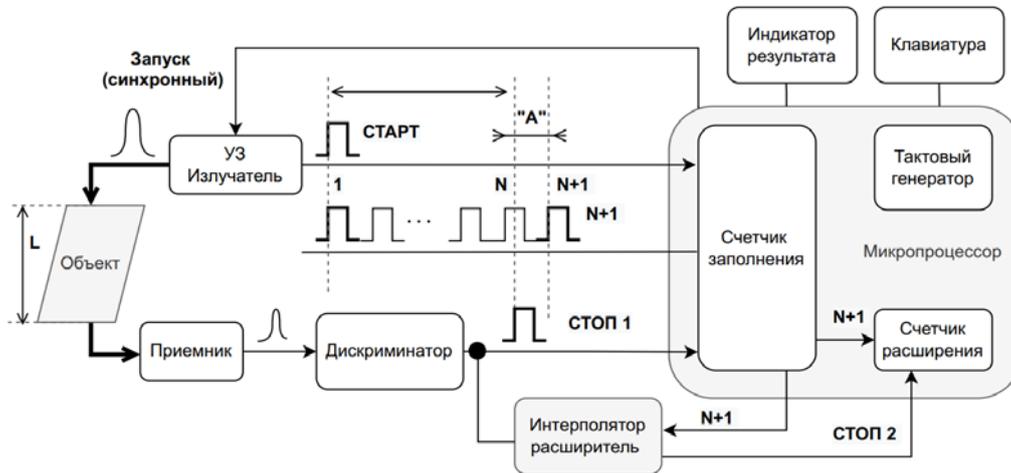


Рис.1. Структурно-функциональная схема преобразователя временных интервалов

Запуск зондирующего ультразвукового импульса осуществляется синхронно с тактовой серией микропроцессора, этот же импульс СТАРТ запускает внутренний 32-х разрядный счетчик (таймер) подсчета импульсов заполнения, и останавливает счет по приходу ближайшего тактового импульса после принятого импульса СТОП 1. Неопределенность положения стопового импульса уменьшается за счет разработанной схемы аналогового интерполятора. В ней одновременно с приходом асинхронного стопового импульса СТОП 1 осуществляется запуск двух идентичных схем заряда конденсаторов С1 и С2, зарядка конденсатора С1 останавливается с приходом ближайшего счетного импульса тактовой серии N+1, а зарядка С2 – только по достижении уровня напряжения  $U(C1)$  – в момент времени выработки сигнала СТОП 2. Токи зарядки в обеих схемах идентичны, а значения емкостей разные, что даёт коэффициент расширения интервала, равный отношению емкостей  $C1/C2$ . Счетчик расширения считает тактовые импульсы от момента N+1 до СТОП 2, обеспечивая итоговое разрешение на уровне единиц наносекунд с учетом коэффициента расширения.

Разработанное схемотехническое решение для преобразователя временных интервалов промоделировано с использованием SPICE-симулятора LTspice [5], предназначенного для компьютерного моделирования работы аналоговых и цифровых электрических цепей. Макетный вариант преобразователя опробован и протестирован на отладочной плате процессора STM32F401 с ядром ARM Cortex-M4. Этот недорогой

микроконтроллер содержит всю необходимую периферию, блок вычислений с плавающей точкой и обладает ультранизким динамическим потреблением даже при максимальной тактовой частотой 84 МГц.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования измерительных режимов аналого-цифрового интерполятора и временные диаграммы, подтверждающие работоспособность предложенного решения.

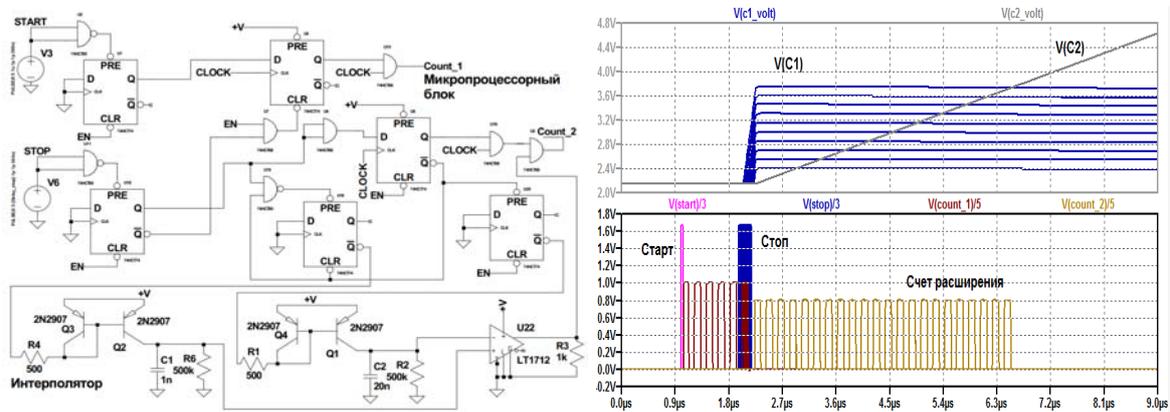


Рис.2. Преобразователь временных интервалов и временные диаграммы его работы

**Выводы.** Предложено бюджетное решение для преобразователя временных интервалов, встроенного в управляющую микропроцессорную систему технологического ультразвукового дефектоскопа – индикатора структуры чугуна. Аппаратно-программное решение основано на синхронности зондирующего импульса и момента запуска счетчика заполнения. Повышение временного разрешения преобразователя достигается за счет аналого-цифрового интерполятора – расширителя стартового времяизмерительного импульса. Реализация позволит проводить 100 % контроль продукции в условиях литейного производства без использования дорогостоящего метрологического оборудования и привлечения высококвалифицированного персонала. Наносекундное разрешение позволит контролировать даже тонкостенные отливки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Семеренко А. В., Богомолов И. А. Контроль структуры чугуна с применением ультразвукового толщиномера Microgage III [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.sonatest.ru/publications\\_7.html](http://www.sonatest.ru/publications_7.html). – Дата доступа 21.04.2022.
2. Воронкова Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 25 с.
3. Майоров А. Л., Баев А. Р., Коновалов Г. Е., Гиль Н. Н. Результаты использования индикаторов структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ в условиях производства // *Литье и металлургия*, № 2 (36), 2006. С. 102–105.
4. LTspice Simulator SPICE-based analog electronic circuit simulator computer software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>. – Дата доступа 21.04.2022.