

УДК 621.317.3

В.Е. УШАКОВ, магистрант гр. ЭНМ-240407 (УрФУ)  
Научный руководитель В.Э. ФРИЗЕН, д.т.н., доцент, (УрФУ)  
г. Екатеринбург

## МОДУЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА

Измерительный тракт в цифровых системах автоматического управления инвертором (САУ) должен быть максимально быстрым и помехоустойчивым. Для реализации этих параметров разрабатывается отдельный модуль измерения с цифровой обработкой сигнала.

Для измерения силы тока и напряжения используются датчики на эффекте Холла. Главное преимущество таких датчиков – это полная гальваническая развязка между высоковольтной и низковольтной цепями. Это обеспечивает высокий уровень безопасности и помехоустойчивости.

LEM LV 25-P – это биполярный датчик, предназначенный для измерения постоянного, переменного и импульсного напряжения. Его работа основана на принципе магнитной компенсации (замкнутого контура), который позволяет точно отслеживать как амплитуду, так и знак (полярность) входного напряжения.

Измеряемое напряжение подаётся на входные клеммы датчика через внешний прецизионный резистор R. Через этот резистор протекает первичный ток, который создаёт магнитное поле в магнитопроводе датчика. Датчик Холла, расположенный в воздушном зазоре магнитопровода, фиксирует это поле и выдаёт сигнал, пропорциональный его напряжённости. Сигнал с датчика Холла поступает на усилитель, который управляет вторичной обмоткой (компенсирующей катушкой). По вторичной обмотке протекает вторичный ток, создающий магнитное поле, противоположное полю от первичного тока. Система стремится к состоянию нулевого магнитного потока в зазоре (принцип нулевого баланса).

Номинальный среднеквадратичный ток первичной обмотки этого преобразователя напряжения составляет 10 мА, измеряемое напряжение находится в пределах 500 В. Таким образом значение входного сопротивления можно выразить следующим образом:

$$R_{\text{вх}} \geq \frac{V_0}{i_i} = \frac{500 \text{ В}}{10 \text{ мА}} = 50 \text{ кОм} \quad (1)$$

Для измерения тока используется датчик LEM LA55-P. Это прецизионный датчик тока с замкнутым контуром на основе эффекта Холла. Принцип его работы такой же, как и у датчика LEM LV 25-P.

Для цифровой обработки измеренных параметров используется 32х битный микроконтроллер STM32F103C8T6. Данный микроконтроллер работает на частоте 72 МГц и имеет два независимых 12 разрядных аналого-цифровых преобразователя (АЦП), что позволяет одновременно обрабатывать сигналы с датчиков тока и напряжения.

Датчики тока и напряжения выдают биполярный сигнал, который необходимо измерить однополярным АЦП. Для этого требуется сдвинуть сигнал на постоянную составляющую. Для решения этой задачи используется операционный усилитель в конфигурации неинвертирующего усилителя со смещением. Диапазон измерения АЦП составляет 3,6 В, соответственно напряжение смещения 1,8 В.

Номинальный выходной ток датчика напряжения составляет 25 мА. Чтобы получить сигнал, совместимый с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), его необходимо преобразовать в напряжение с помощью нагрузочного резистора:

$$R_{\text{н1}} \geq \frac{V_{\text{смеш}}}{i_{\text{вых}}} = \frac{1,8 \text{ В}}{25 \text{ мА}} = 72 \text{ Ом} \quad (2)$$

Номинальный выходной ток датчика тока составляет 50 мА, соответственно нагрузочный резистор должен иметь номинал:

$$R_{\text{н2}} \geq \frac{V_{\text{смеш}}}{i_{\text{вых}}} = \frac{1,8 \text{ В}}{50 \text{ мА}} = 36 \text{ Ом} \quad (3)$$

Дальнейшей обработкой полученных в АЦП цифровых сигналов занимается микроконтроллер. В нем вычисляется амплитуда, частота, действующее значение тока и напряжения, мощность и разность фаз между током и напряжением.

При переходе измеряемых величин через ноль меняет состояние соответствующий дискретный выход микроконтроллера, при этом логическая единица соответствует положительной полуволне измеряемой величины, логический ноль – отрицательной.

Связь с микроконтроллером САУ осуществляется при помощи протокола SPI – синхронного последовательного интерфейса. Микроконтроллер модуля измерения электрических величин (далее модуль измерения) конфигурируется как Full-Duplex Slave, а микроконтроллер САУ – в Full-Duplex Master.

Так как в модуле измерения вычисляется много значений, то используется двухэтапный обмен: 1 – мастер (микроконтроллер САУ) отправляет команду, 2 – мастер отправляет пустой пакет и получает ответ. При этом в ведомом микроконтроллере модуля измерения при подключении мастера отправляются «старые» данные, сформированные при предыдущем подключении, и формируются новые данные согласно полученной команде.

Использование в цифровой обработке измеряемых величин дополнительного микроконтроллера на модуле измерения позволяет решить следующие задачи:

1. Повышение надёжности и отказоустойчивости

- Гальваническая развязка и защита основного контроллера: локальный микроконтроллер соединен через изолированные интерфейсы.

- Локальная диагностика и самотестирование: дополнительный микроконтроллер может выполнять непрерывный мониторинг датчиков и инициировать локальное аварийное отключение.

2. Улучшение быстродействия и снижение нагрузки на основной контроллер

- Предварительная обработка сигналов: локальный МК выполняет фильтрацию, усиление, линеаризацию и калибровку в реальном времени.

- Снижение объёма передаваемых данных: система передаёт обработанные значения по цифровой шине вместо передачи по аналоговым линиям, что уменьшает влияние помех на линиях связи.

- Параллелизм и детерминированность: каждый измерительный узел работает независимо и параллельно.

3. Повышение точности и гибкости

- Индивидуальная калибровка каждого вынесенного узла, что компенсирует разброс параметров датчиков.

4. Упрощение разводки и масштабируемость

- Сокращение аналоговых трасс: Аналоговые сигналы (чувствительные к помехам) передаются на короткие расстояния (в пределах одной платы). Между модулями используется цифровая связь, устойчивая к помехам.

- Упрощается обслуживание и замена.

Список литературы:

1. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. Москва: Техносфера, 2011. – 576 с.
2. Yavuz Koç. Design of Voltage Transducer for Digital Signal Processing Development Kit in Implementation of a High Step-up DC-DC Converter // Journal of Advanced Applied Sciences – №2(2). – 2023. – С. 51-56
3. LEM. LV 25-P Technical Datasheet. Rev. 1.2, 2021. – 4 с.

**VIII Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

339-4

**21-22 ноября 2025 г.**

---

4. LEM. International SA. (2022). LA55-P Closed-Loop Hall Effect Current Transducer Datasheet (Ref. 12031, Rev. 5). – 3 с.

Информация об авторах:

Ушаков Владимир Евгеньевич, магистрант гр. ЭНМ-240407, УрФУ, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, volhv75@gmail.com

Фризен Василий Эдуардович, д.т.н., доцент, УрФУ, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, vfrizen@yandex.ru