

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО ДВОЙНОГО СЧЕТЧИКА ЭНЕРГИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ НАГРУЗКИ И СЕТЕВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Маякин Г.О.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научные руководители: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС;
Яцук В.А. – магистр, ассистент кафедры ПИКС*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы проектирования интерактивного двойного счетчика энергии с возможностью построения профиля нагрузки и сетевым интерфейсом. В качестве аппаратной платформы используется демонстрационная плата на базе специализированного измерительного модуля, обеспечивающего измерение электрических параметров для двух независимых нагрузок с использованием шунтов и трансформаторов тока. Проанализированы основные проблемы проектирования подобных устройств, включая точность измерений, электрическую безопасность, надежность передачи данных и выбор интерфейсов связи. Предложена архитектура системы, включающая силовую часть, измерительный модуль, систему питания и интерфейсы взаимодействия с внешними устройствами. Рассмотрен пример реализации устройства и приведены особенности его работы. Показано, что применение двухканального измерения и сетевых интерфейсов позволяет повысить эффективность мониторинга и анализа энергопотребления.

Ключевые слова: счетчик энергии, профиль нагрузки, мониторинг энергопотребления, измерение мощности, трансформатор тока, USB интерфейс.

Введение. Современные методы измерения электроэнергии основаны на цифровой обработке электрических сигналов и позволяют получать не только суммарное значение потребленной энергии, но и более детальную информацию о параметрах электрической сети. В отличие от устаревших электромеханических устройств, современные электронные счетчики реализуют измерения с использованием микропроцессорной техники, что обеспечивает более высокую точность и расширенный функционал [1].

С развитием концепции интернета вещей (IoT) возрастают требования к функциональности устройств учета и мониторинга энергопотребления. Помимо базового измерения электрических параметров, необходимо обеспечивать удаленный доступ к данным, визуализацию энергопотребления и построение профиля нагрузки, а также интеграцию в сетевую инфраструктуру. В этом контексте перспективным является использование специализированных измерительных микросхем и модулей с поддержкой цифровых интерфейсов обмена данными.

Целью данной работы является разработка и анализ архитектуры интерактивного двойного счетчика энергии с возможностью построения профиля нагрузки и сетевым интерфейсом, а также исследование особенностей его практической реализации.

Трансформация систем учета электроэнергии в условиях цифровизации энергетики. Современный этап развития электроэнергетики характеризуется масштабной трансформацией систем учета электрической энергии. Переход от традиционных индукционных счетчиков к интеллектуальным приборам учета (Smart Meters) является ключевым направлением цифровизации.

Интеллектуальные системы учета электроэнергии (ИСУЭ) решают комплекс задач, выходящих за рамки простого измерения потребленной энергии. К их функциям относятся: автоматизированный сбор и передача данных о потреблении; дистанционное управление режимами учета; мониторинг качества электроэнергии; построение профилей нагрузки потребителей; обеспечение взаимодействия с интеллектуальными сетями (Smart Grid).

Внедрение интеллектуальных счетчиков позволяет повысить точность учета, снизить коммерческие потери электроэнергии, оптимизировать нагрузочные режимы энергосистемы и создать основу для внедрения дифференцированных по времени суток тарифов, стимулирующих энергосбережение.

Республика Беларусь в рамках реализации государственной энергетической политики осуществляет масштабную модернизацию системы учета электрической энергии.

Необходимость развития функциональности приборов учета. Несмотря на активное внедрение интеллектуальных систем учета, существующие решения обладают рядом ограничений, требующих дальнейшего совершенствования:

- большинство серийно выпускаемых счетчиков предоставляют пользователю минимальный объем информации – суммарное потребление энергии за расчетный период. При этом отсутствует возможность оперативного получения данных о текущем потреблении, профиле нагрузки, временных интервалах максимального и минимального энергопотребления. Такая информация необходима не только энергоснабжающим организациям для планирования нагрузок, но и потребителям для оптимизации собственного энергопотребления;

- традиционные системы учета ориентированы на одностороннюю передачу данных от прибора учета в энергоснабжающую организацию. Интерактивное взаимодействие, позволяющее потребителю получать актуальную информацию о своем энергопотреблении в удобной форме (через мобильные приложения, веб-интерфейс или непосредственно на дисплее прибора), реализовано недостаточно широко;

- в ряде сценариев использования (объекты с собственной генерацией, системы накопления энергии, электростанции, энергоактивные дома) возникает потребность в учете как потребленной, так и отданной в сеть энергии. Двойные счетчики, фиксирующие разнонаправленные потоки энергии, становятся критически важными для обеспечения справедливых финансовых расчетов между потребителем-генератором и сетевой организацией;

- современные подходы к управлению энергопотреблением и тарифообразованию требуют детальной информации о временной структуре нагрузки. Построение профиля нагрузки позволяет: выявлять пиковые нагрузки и оценивать возможности их переноса; обосновывать выбор тарифной схемы; прогнозировать потребление для целей диспетчерского управления.

Основная часть. В основу разработки положена архитектура двухканального измерителя электрической энергии, реализованная с использованием специализированного измерительного интегрального модуля и демонстрационной платы с поддержкой подключения двух независимых нагрузок. [2].

Принципиальная схема устройства включает силовые клеммы для подключения к сети переменного напряжения 230 В и нагрузок, а также измерительные цепи напряжения и тока. Питание устройства формируется непосредственно от сети с использованием импульсного преобразователя, обеспечивающего стабилизированное напряжение порядка 12 В, которое далее понижается линейным стабилизатором до уровней 5 В и 3,3 В для питания цифровых компонентов. Для защиты от перенапряжений применяются варисторы и защитные диоды, а для подавления электромагнитных помех используются фильтрующие элементы, включая конденсаторы и дроссели.

Измерительные каналы реализованы с возможностью выбора метода измерения тока – с использованием шунтовых резисторов или трансформаторов тока, а измерение напряжения осуществляется либо напрямую через делитель, либо через понижающий трансформатор. Обработка измеренных данных выполняется встроенным измерительным модулем с последующей передачей результатов через интерфейс USB или через изолированные цифровые линии на внешние устройства, включая микроконтроллерные системы.

Проектируемая печатная плата выполнена из стеклотекстолита FR-4 толщиной 1,5 мм. Плата двухсторонняя, 3-го класса точности.

Паразитная ёмкость между проводниками определяется с учётом диэлектрической проницаемости материала основания, длины взаимного перекрытия и геометрических параметров проводников, что особенно важно для обеспечения корректной работы чувствительных измерительных и цифровых цепей. Расчёт показал, что минимальная ширина проводников для цепей питания составляет 0,214 мм, однако с учётом технологического запаса было принято значение 0,3 мм. Для сигнальных цепей выбрана ширина проводников 0,2 мм [3].

При работе устройства выделяется тепловая мощность порядка 2-3 Вт.

Расчёт показал, что перегрев корпуса составляет около 10,56 К, температура нагретой зоны достигает 55,6 °С при температуре окружающей среды 50 °С (рисунок 1).

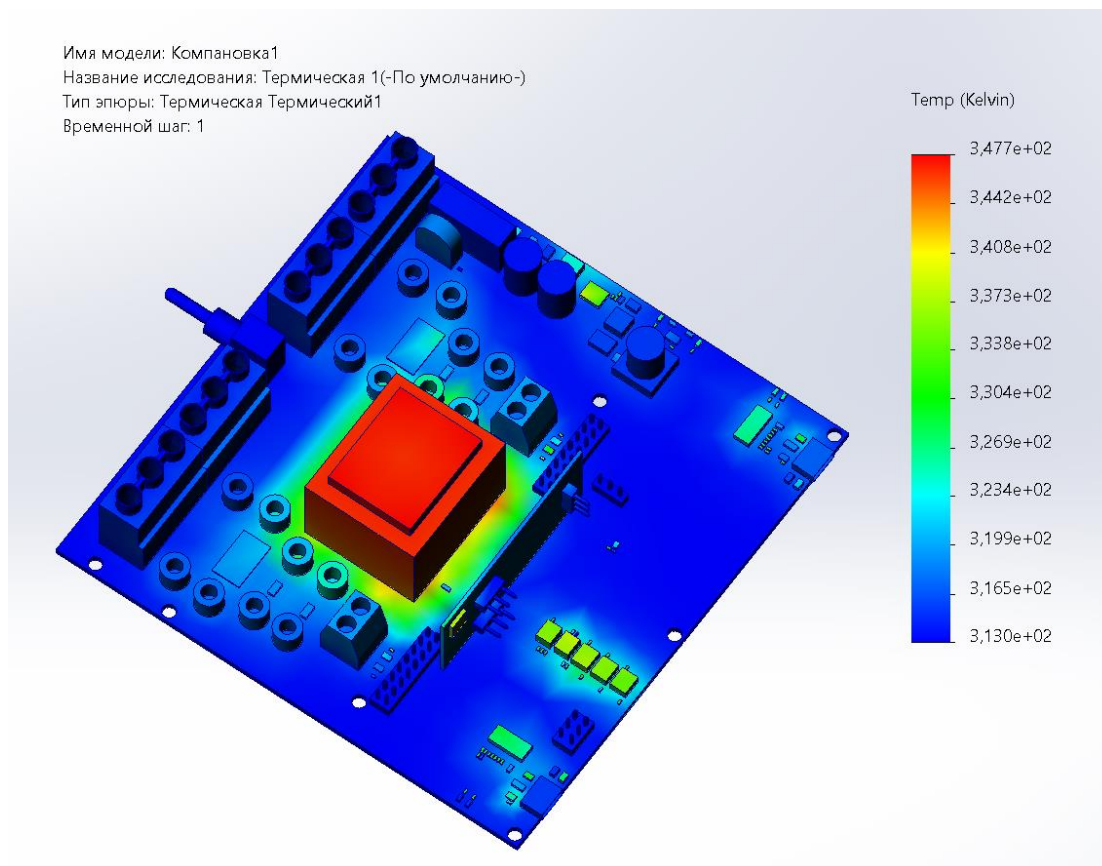


Рисунок 1 – Результат моделирования тепловых процессов в SolidWorks

Полученные значения находятся ниже допустимых температур для элементной базы, что подтверждает возможность эксплуатации устройства без применения активного охлаждения. Естественная конвекция через перфорированный корпус обеспечивает достаточный теплоотвод.

Надёжность устройства определяется суммарной интенсивностью отказов всех элементов, которая рассчитывается как сумма интенсивностей отказов отдельных компонентов с учётом их количества [4].

В результате расчёта получена средняя наработка на отказ порядка 23410 часов и вероятность безотказной работы за 1000 часов около 0,96.

Полученные значения свидетельствуют о достаточно высокой надёжности устройства и позволяют использовать его в составе систем мониторинга энергопотребления без дополнительных мер по повышению отказоустойчивости. При этом для эксплуатации в ответственных или промышленных условиях может потребоваться применение компонентов с более высокой надёжностью и проведение дополнительной оптимизации конструкции.

Разработанное устройство обеспечивает одновременный мониторинг двух нагрузок с возможностью анализа энергопотребления и построения профиля нагрузки. Использование различных методов измерения и интерфейсов связи повышает гибкость системы, а наличие гальванической развязки и защитных элементов обеспечивает безопасность и устойчивость работы при подключении к электрической сети.

Заключение. Разработан интерактивный двойной счетчик энергии с возможностью построения профиля нагрузки и сетевым интерфейсом, обеспечивающий измерение электрических параметров для двух независимых нагрузок. В ходе работы была предложена и реализована архитектура устройства, включающая силовую часть, измерительные каналы с возможностью выбора метода измерения, систему питания и интерфейсы передачи данных. Проведён анализ схемотехнических решений, а также учтены паразитные параметры печатной платы, влияющие на точность и стабильность работы устройства.

Результаты теплового расчёта показали, что температурные режимы находятся в допустимых пределах, что позволяет эксплуатировать устройство без применения активного охлаждения.

Оценка надёжности показала достаточный уровень безотказной работы, позволяющий использовать устройство в системах мониторинга энергопотребления.

Разработанное устройство обладает необходимыми функциональными возможностями, обеспечивает стабильную и безопасную работу и может быть использовано для анализа энергопотребления и построения профиля нагрузки в различных прикладных задачах.

Список литературы

1. Destro M. Energy Meter duale // *Elettronica In.* – 2024. – № 279 – С. 111–124.
2. Лежнев, А.В. Цифровые измерительные системы учета электроэнергии: учебное пособие / А.В. Лежнев. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 88 с.
3. Основы проектирования печатных плат : учебное пособие / под ред. В. В. Кузнецова. – Москва : Машиностроение, 2018. – 256 с.
4. Методы расчёта надёжности радиоэлектронных средств : учебное пособие / под ред. Н. Н. Смирнова. – Москва : Радио и связь, 2015. – 288 с.

UDC 621.317.785.5:004.9

DESIGN OF AN INTERACTIVE DUAL ENERGY METER WITH LOAD PROFILING CAPABILITY AND NETWORK INTERFACE

Mayakin G.O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD, Yashchuk V.A. – master's degree student, Assistant Professor, Department of Information and Computer Systems Design

Annotation. This work addresses the design of an interactive dual energy meter featuring load profiling capabilities and a network interface. The hardware platform utilized is a demonstration board based on a specialized measurement module, which enables the measurement of electrical parameters for two independent loads using shunts and current transformers. The key design challenges associated with such devices are analyzed, including measurement accuracy, electrical safety, data transmission reliability, and the selection of communication interfaces. A system architecture is proposed, comprising a power section, a measurement module, a power supply system, and interfaces for interaction with external devices. An example implementation of the device is presented, along with a description of its operational characteristics. It is demonstrated that the application of dual-channel measurement and network interfaces enhances the efficiency of energy consumption monitoring and analysis.

Keywords: energy meter, load profile, energy consumption monitoring, power measurement, current transformer, USB interface