

УДК 550.82

Постнов А.А., [alexposts@yandex.com](mailto:alexposts@yandex.com)

Институт Коммуникаций и Информационных Технологий КРСУ

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЫПРЯМЛЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОЙ ПОЛЯРНОСТИ

В данной статье были рассмотрены схемотехнические решения, а также представлены технические расчеты для построения систем выпрямления и накопления электрической энергии с питанием от низкоэнергетических источников переменной полярности. Подобные источники электрической энергии, ввиду большого внутреннего сопротивления и низких показателей амплитуды выходного напряжения, для достижения приемлемых показателей КПД, требуют специального подхода как в выборе компонентов, так и применения специальных схемотехнических приемов.

**Ключевые слова:** низкоэнергетические источники электрической энергии, методы повышения КПД для выпрямительных систем, синхронное выпрямление, электронные компоненты для накопления энергии

### Введение

В промышленной электронике широко распространены системы с питанием от низкоэнергетических источников электрической энергии, с питанием от энергии полезного сигнала или с паразитным питанием. К таким системам, например относятся датчики различных физических величин с питанием от сигнальной токовой петли 4..20мА, питание части электронной схемы для реализации гальванической развязки, питание от энергии сигнала индуктивного датчика оборотов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и т.п. Так же стоит отметить системы радиочастотной идентификации, где полезные данные могут храниться в так называемом транспондере или RFID-метке (смарт-карты, карты доступа, платежные системы и т.д.). Этот прибор вообще не имеет никаких источников питания. Прежде всего для минимизации габаритов и для неограниченного срока службы. Он получает энергию электромагнитного излучения от своего считывателя, использует для кратковременной работы своей электронной схемы и для передачи ответного сигнала [1].

Рассматривая подобные системы, мы неизбежно приходим к нескольким обязательным принципам, которые стоит учитывать при их построении:

- низкое или сверхнизкое энергопотребление электронных компонентов системы
- способность работать с первичным источником электрической энергии, обладающим высоким внутренним сопротивлением (от 1000 Ом и выше)
- возможность накапливать значительный запас электрической энергии на время полного отсутствия энергии в первичном источнике
- нежелательное использование дополнительных внешних источников питания ввиду усложнения схемы и ухудшения эксплуатационных характеристик
- для систем с источником электрической энергии переменной полярности – применение схемотехнических решений для минимизации потерь на выпрямление

Для реализации этих принципов требуются специальные методы выпрямления и накопления электрической энергии, которые будут рассмотрены далее.

### Источник электрической энергии (ПИП)

В качестве примера низкоэнергетического источника электрической энергии рассмотрим индуктивный датчик положения коленчатого вала (ДПКВ) ДВС. Физические принципы подробно рассматриваются по ссылкам, в том числе зубчатое колесо с подмагничиванием постоянными магнитами [2,3]:



Рисунок 1 – Индуктивный датчик положения коленчатого вала ДВС и зубчатое колесо

Датчик представляет собой электромеханический прибор, в составе которого имеется постоянный магнит и катушка со следующими характеристиками обмотки: внутреннее сопротивление  $R_{вн} = 1\text{кОм}$ , индуктивность  $L = 673\text{мГн}$ . В процессе работы, датчик взаимодействует с зубьями зубчатого колеса, закрепленного на коленчатом валу. При этом вырабатывается ЭДС с частотой, пропорциональной частоте вращения коленчатого вала, амплитудой, зависящей от величины воздушного зазора и длины магнитопровода. Электрический сигнал датчика используется системой управления двигателя для задачи синхронизации работы топливной системы. Кроме этого, датчик может быть подключен к другому электромеханическому устройству – тахометру и служит для индикации текущей частоты оборотов ДВС. Максимальная амплитуда полезного сигнала таких датчиков (на максимальных оборотах вращения) может составлять  $U_m = 3\text{В}$ , а частота достигать  $600\text{ Гц}$ . Учитывая внутреннее сопротивление, мы можем оценить максимум активной электрической энергии этого прибора, работающего в режиме короткого замыкания:

$$P_{\text{общ}} = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_{\text{вн}}} * \cos \varphi = \frac{\left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right)^2}{1000} * 1 = 4,5\text{мВт} \quad (1)$$

Для получения приемлемой для выпрямления амплитуды полезного сигнала, мы сможем использовать лишь небольшую часть этой энергии для питания электронных схем и расширения качественных характеристик самого датчика.

В экспериментальной части статьи будут показаны энергетические характеристики такого индуктивного датчика, полученные в ходе стендовых измерений. Значение постоянного выпрямленного напряжения на нагрузочном сопротивлении  $10\text{кОм}$  составляет  $2\text{ В}$  при частоте переменного напряжения  $600\text{ Гц}$ . Это позволяет рассчитать порядок полезной мощности, которую можно использовать для питания:

$$P_{\text{полез.}} = \frac{(2)^2}{10000} * 1 = 0,4\text{мВт} \quad (2)$$

Понятно, что реальные значения полезной энергии зависят прежде всего от величины реального магнитного зазора и частоты вращения зубчатого колеса. Однако этот показатель позволяет нам оценить уровень полезной мощности и произвести выбор тех или иных электронных компонентов и схемных решений.

А учитывая, что полезный сигнал имеет переменную полярность, то должны быть рассмотрены и методы для его эффективного выпрямления и накопления. Стоит отметить, что кроме электрических методов повышения эффективности подобных систем, известны и методы их конструктивного улучшения. Например, с целью повышения энергетических характеристик [4].

### **Методы выпрямления и накопления энергии полезного сигнала**

Известны классические полупроводниковые кремниевые диоды, применяемые для выпрямления электрической энергии переменной полярности. Среди выпрямительных диодов есть множество их типов по назначению, частотному диапазону, конструкции и т.п. Наибольшее распространение для задач выпрямления сигналов, а также низковольтной силовой техники получили диоды с переходом Шоттки. Это переходный слой, в котором существует контактное (или диффузионное) электрическое поле и который образован в результате контакта между металлом и полупроводником [5]. В отличие от перехода

полупроводник-полупроводник, такая конструкция перехода позволила получить падение напряжения на диоде этого типа, при его прямом включении и максимально-допустимом токе, через прибор 0,2—0,4 вольта, в то время как для обычных, например, кремниевых диодов с p-n-переходом это значение порядка 0,6—0,7 вольта.

Для задачи выпрямления сигналов переменного напряжения диоды собираются в различные схемы, например, полный мост Гретца, выпрямитель Миткевича, звезда-Ларионова и т.д. Подробно описаны здесь: [6]

Также известны схемы, выполняющие одновременно выпрямление сигнала и повышение амплитуды выходного напряжения постоянного тока. К таким схемам относятся удвоитель напряжения Латура-Делона-Гренашера, Генераторы Кокрофта-Уолтона и прочие умножители напряжения. Однако у этих схем есть одна существенная особенность - нагрузочная способность умножителя пропорциональна частоте, величине емкости входящих в его состав конденсаторов и обратно пропорциональна количеству звеньев умножения.

Для полноты рассмотрения приведенных способов выпрямления, а также накопления энергии сигналов переменной полярности необходимо рассмотреть и схемы замещения двух их главных составляющих элементов – диода и конденсатора:

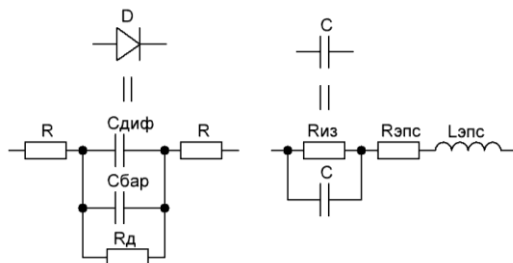


Рисунок 2 – Схемы замещения неидеального диода и конденсатора

Для диода схема замещения состоит из:

Сбар - барьерная емкость, отрицательно влияет на выпрямление переменного тока, потому как она шунтирует диод и через нее на высоких частотах проходит переменный ток;

Сдиф - диффузионная емкость, которая также нелинейна и возрастает при увеличении прямого напряжения. Диффузионная емкость гораздо больше барьерной, но она в большинстве случаев не оказывает влияния на работу диода, так как она всегда зашунтирована малым прямым сопротивлением самого диода  $R_d$ .

Далее следуют сопротивления контактов диода  $R$ , однако в случае применения диода совместно с источниками энергии с внутренним сопротивлением в  $1\text{кОм}$  и выше, оценивать влияние сопротивления контактов в доли  $\text{Ом}$ , не имеет смысла. Поэтому, в нашем случае, для схемы замещения стоит учитывать именно барьерную емкость  $C_{бар}$ .

Для конденсатора схема замещения представлена следующими элементами:

$C$  – емкость конденсатора;

$L_{эпс}$  – паразитная индуктивность, определяемая конструкцией, размерами обкладок и должна быть учтена при применении конденсатора на высоких частотах. Особенно к частотам, близким к резонансной для самого конденсатора. Учитывая, что частота нашего источника энергии (до  $1\text{кГц}$ ) далека от резонансной для большинства современных низковольтных конденсаторов, то влияние этого элемента можно не учитывать.

$R_{из}$  – сопротивление изоляции, обусловлено наличием свободных электронов в диэлектрике конденсатора и зависит от рабочей температуры (с повышением температуры  $R_{из}$  изменяется в десятки раз и более). Если к конденсатору приложено постоянное напряжение, то ток через него определяется этим сопротивлением.

$R_{эпс}$  – последовательно сопротивление потерь, обусловлено потерями на диэлектрике. Под действием переменного тока происходит изменение состояния (поляризация) диэлектрика, на которое затрачивается электрическая мощность. Для количественной оценки

потерь пользуются таким понятием, как тангенс угла диэлектрических потерь:  $\operatorname{tg}\delta = R_{\text{эср}}^* \omega * C$ , где  $\omega$  – частота;  $C$  – емкость конденсатора.

Для задачи выпрямления низкоэнергетических источников энергии переменной полярности предлагаем рассмотреть схему Латура–Делона–Гренашера. И привести эту схему к реальной с учетом вышеупомянутых схем замещения.

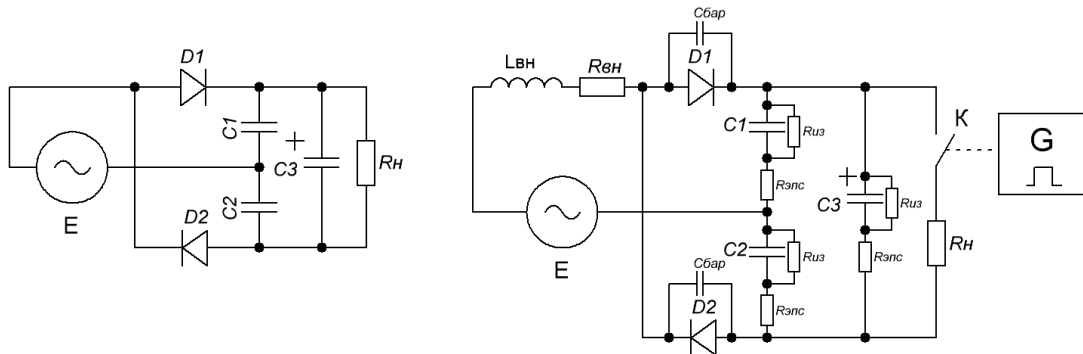


Рисунок 3 – Источник энергии, удвоитель напряжения, нагрузка и их схемы замещения

Выбор именно этой схемы выпрямителя обусловлен несколькими факторами:

- мостовая схема имеет вдвое больше диодов, а значит повлечет за собой вдвое большее падение напряжение для выпрямления сигнала
- удвоение напряжения имеет важную роль для источников энергии с низким выходным напряжением
- обладает наилучшей нагрузочной способностью среди других удвоителей и умножителей напряжения. Подробно умножители рассмотрены здесь: [7]
- источник напряжения имеет смещение относительно половины выпрямленного напряжения, а значит схема синхронизации фазы может быть организована более простыми схемотехническими решениями. Например, для получения формы или расчета частоты сигнала.

На Рисунке 3 все элементы идеальной схемы слева заменены на реальные схемы замещения на схеме справа. Источник энергии - индуктивный датчик, представлен здесь в виде идеального источника переменной ЭДС –  $E$ , с внутренними индуктивностью  $L_{\text{вн}}$  и сопротивлением  $R_{\text{вн}}$  подключен к удвоителю напряжения на диодах  $D1$ ,  $D2$  и конденсаторах  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$ . Диоды шунтируются внутренней барьерной емкостью  $C_{\text{бар}}$ , которая проводит переменный ток и приводит к потерям. Конденсаторы шунтируются емкостью изоляции  $R_{\text{из}}$  и последовательно соединены с их внутренним эквивалентным последовательным сопротивлением  $R_{\text{эпс}}$ . Последовательное сопротивление  $R_{\text{эпс}}$  обычно учитывают в силовых схемах, потому как оно приводит к потерям при значительных токах, особенно на переключения. А вот сопротивление изоляции конденсаторов  $R_{\text{из}}$  должно учитываться при проектировании подобных устройств. Потому как часто хоть оно и велико, но является постоянной нагрузкой для источника питания.

В качестве нагрузки служит сопротивление  $R_{\text{н}}$ , которое подключается с помощью ключа  $K$  на короткое время, имитируя тем самым полезную нагрузку. Все остальное время нагрузкой выпрямителя должен быть заряжающийся конденсатор, который обеспечит полезную нагрузку на короткое время достаточным током. Например, исполнения участка кода микроконтроллера, передачи телеметрии по радио-каналу, работы внешних КМОП-устройств и т.п. Постоянная включенная, активная нагрузка в подобных системах недопустима ввиду малых порядков энергии полезного сигнала. Генератор  $G$  создает периодические, например раз 5с, короткие импульсы для включения ключа  $K$ .

### Выбор выпрямительных диодов

В качестве реального выпрямительного диода рассмотрим кремниевый эпитаксиальный диод с барьером шоттки CUS520 от производителя Toshiba Semiconductor. С технической

спецификацией на диод можно ознакомиться по ссылке [8]. Далее, на Рисунке 4 представлены его основные характеристики.

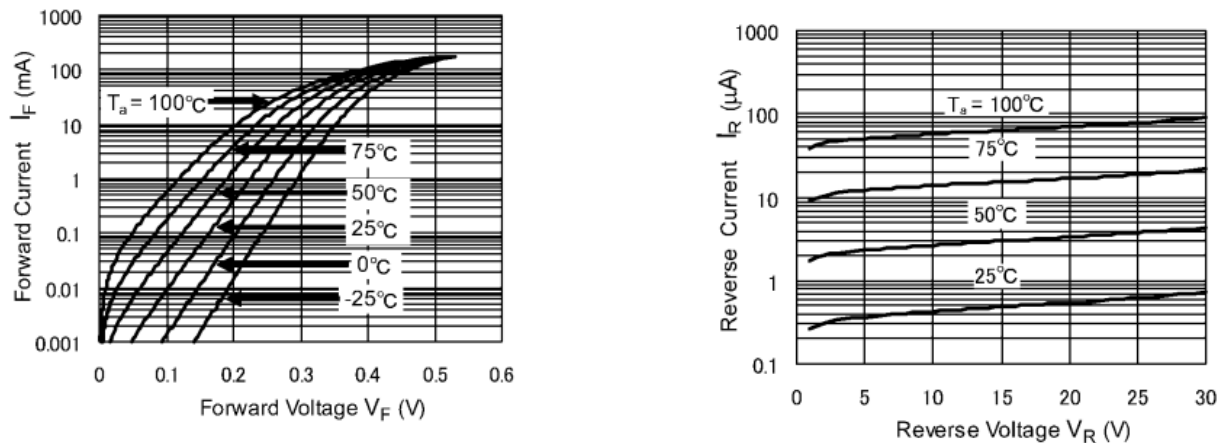


Рисунок 4 – Вольт–амперная характеристика и зависимость обратного тока от величины обратного напряжения диода CUS520

Стоит отметить, что в диапазоне прямого тока 1..10мА, падение напряжение на переходе диода составляет 0.2..0.3В при температуре +25С°. А обратный ток составляет всего 0.4мкА при обратном напряжении 5В (приведённый в качестве примера, источник энергии имеет показатели максимальной амплитуды полезного сигнала не более 5В). Кроме этого, диод обладает весьма низким показателем барьерной емкости – 5пФ, что положительно сказывается на уменьшении общих потерь на переключение. Возможно проводить сравнения с обычными типами кремниевых или германиевых диодов, но столь низкие показатели прямого падения напряжения и обратного тока лишает это всякого смысла.

Однако, все же рассмотрим какую долю потерь среди прочих, вносит применение таких диодов. Расчет полезной мощности по формуле (2) позволяет понять порядок силы тока на котором работают такие диоды:  $I_2 = P_{\text{полез}} / R_n = 0.4/10000 = 40\text{мкА}$ , и соответственно постоянные потери на диодах:  $P_{\text{диоды}} = 40\text{мкА} * 0.1 = 4\text{мкВт}$ . Понятно, что реальный ток на диодах, а соответственно и падение напряжения, носит импульсный, а не постоянный характер. Диоды будут открываться и проводить ток только в моменты когда амплитуда полезного сигнала превышает текущее постоянное напряжение фильтрующей емкости. Приведенный порядок потерь на диодах, позволяет сделать вывод о том, что данный тип полупроводникового прибора подходит для применения совместно с нашим источником питания и процент потерь на диодах составляет всего порядка 1%.

Этот уровень потерь рассмотрен, когда амплитуда полезного сигнала и уровень энергии довольно высоки. Но на частоте полезного сигнала 80Гц, и нагрузке 10кОм, мы имеем дело с полезным напряжением всего 1В и полезной мощностью  $P_{\text{полез}} = I^2 / 10000 = 0.1\text{мВт}$  и, хотя, ввиду уменьшения тока, так же уменьшится доля потерь на диодах, но начинают сказываться два важных фактора, которые могут помешать работе устройства. Первый – не смотря на низкие обороты вращения (низкую частоту и напряжение) – источник питания должен продолжать обеспечивать устройство стабилизированным питанием. Поэтому с уменьшением входного напряжения – общий ток потребления вырастет. И второй фактор – если речь идет о напряжениях близких или меньше 1В, то может наступить предел, при котором ни одна из интегральных схем работать или запуститься не сможет ввиду современных технологических ограничений, прежде всего полевых транзисторов.

В этой связи, многие производители интегральных схем предлагают решение в виде «идеального диода» [9]. Идеальный диод – это некоторая идеализация диода, при которой учитываются только его основные свойства, а побочные эффекты нивелируются. В частности, сводится к минимуму прямое падение напряжения на диоде. Это достигается с

помощью шунтирования диодов с помощью полевых транзисторов, которые открываются по командам контроллера, встроенного в интегральную схему. Однако, у многих подобных устройств порог начала функционирования начинается от нескольких вольт питающего напряжения. И, соответственно, не подходит для использования в цепях питания наших устройств. Далее, на рисунке 5 пример подобного устройства от производителя Linear Technology.

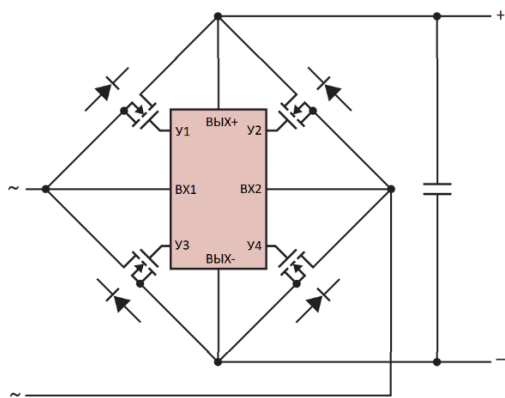


Рисунок 5 – Мост из 4х «идеальных диодов» от Linear Tech

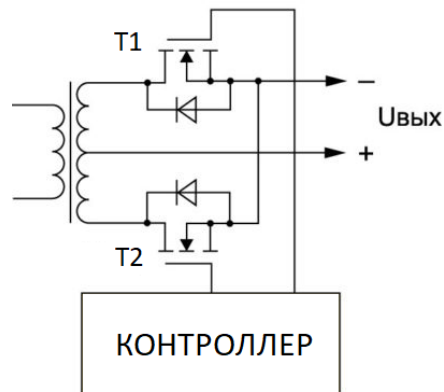


Рисунок 6 – Общий вид схемы синхронного выпрямителя для схемы Миткевича

Подобные «идеальным диодам» решения в преобразовательной технике называются синхронными выпрямителями. Когда силовые диоды шунтируются полевыми транзисторами, имеющими очень малое сопротивление открытого канала. Особенно актуально это становится тогда, когда рабочие токи выпрямителя имеют порядки десятков ампер, и применение обычных диодов Шоттки приводит к большим тепловым потерям. Так, например, для N-канального МОП-транзистора SI7174 при токе 20 А с сопротивлением  $R_{DS(ON)} = 0,007$  Ом рассеиваемая на транзисторе мощность составит 2,8 Вт, что позволит отказаться от радиатора и использовать отвод тепла только через поверхность печатную плату. А габаритный охлаждающий радиатор вовсе не потребуется [10].

Но технологии синхронного выпрямления применяются не только в силовых преобразователях, но и в устройствах с очень низкими показателями энергии полезного сигнала. Например, для преобразования и стабилизации полезной энергии от термоэлектрического генератора (элемент Пельтье). Производитель Analog Devices предлагает применять повышающий Step-Up контроллер питания, который с внешним повышающим трансформатором, с коэффициентом трансформации 1:100, позволяет запускаться и стабилизировать питающее напряжение при чрезвычайно низких значениях полезного напряжения начиная уже с 20мВ! Ссылка на сайт производителя [11].

Подводя итог по вопросу подбора полупроводниковых устройств для процесса выпрямления электрической энергии низкоэнергетических источников переменной полярности можно утверждать, что если доля потерь от применения обычных диодов шоттки не превышает 1%, то их прямое применение оправдано. Как минимум для упрощения и удешевления схемы. Если же мы имеем дело с уровнем потерь от выпрямления 5% и более, и особенно если источник полезной энергии имеет амплитуду полезного сигнала менее 1В, то вполне может быть рассмотрено применение синхронного выпрямителя с использованием специализированных контроллеров.

### Выбор конденсаторов

Обычной практикой для выпрямителей построенной по приведенной на Рисунке 3 схеме является применение керамических конденсаторов малой емкости С1 и С2 для работы полу мостовой схемы и полярный электролитический конденсатор большой емкости С3 для сглаживания пульсаций выходного напряжения. Современная промышленность предлагает

очень широкий выбор конденсаторов разных типов для разработчиков электронной техники. В статье по ссылке [12] проведен обзор основных мировых производителей этих электронных компонентов. При подборе типов и номиналов конденсаторов должны быть учтены следующие факторы:

- эксплуатация подобных устройств предполагается в широком температурном диапазоне, а возможно и вблизи горячего объекта (двигатель, коробка передач, гидравлическая система и т.п.). А значит конденсатор должен обладать как можно более низким Температурным коэффициентом ёмкости (ТКЕ)

- ввиду отсутствия избытков энергии, конденсаторы должны обладать как можно большим сопротивлением изоляции и, соответственно, минимальными токами утечки

- добротность конденсатора, величина обратная тангенсу угла диэлектрических потерь  $\delta$ , будет определять уровень потерь во время любых переходных процессов

- для задачи накопления электрической энергии должна быть выбрано большое значения емкости, а значит и учитываться удельная емкость.

Если посмотреть на историю развития технологий производства конденсаторов, то долгое время на рынке электронных компонентов существовала тенденция:

- керамические конденсаторы имели невысокую удельную емкость, высокую добротность (например, для фильтрации ВЧ помех), невысокие токи утечки, большая зависимость емкости от приложенного напряжения (особенно для SMD корпусов размером 0603 и меньше)

- танталовые конденсаторы имели более высокую удельную емкость, довольно большое значение ESR, высокую добротность, но и высокую цену

- алюминиевые электролитические конденсаторы имели самую высокую удельную емкость, высокое значение ESR, высокие токи утечки и различные отрицательные эффекты присутствия электролита – высыхание и деградация, а также диэлектрическая абсорбция

Конечно известно множество других типов конденсаторов по конструкции, типу диэлектрика, например пленочные конденсаторы. Но они скорее предназначены для силовой электроники. А мы рассматриваем именно эти 3 типа конденсаторов, которые удобны для применения, широко распространены для низковольтных схем и имеют невысокую стоимость.

Недавнее бурное развитие технологи MLCC – многослойные керамические конденсаторы имеют в своем составе диэлектрик на основе Титаната Бария. Этот диэлектрик позволяет производить конденсаторы с низкими потерями и высокой удельной емкостью. Ученые компании Murata подтвердили, что они способны производить MLCC-конденсаторы гораздо большей емкости, которая соизмерима с показателями пленочных и электролитических емкостей и соответствует требованиям, предъявляемым к устройствам силовой электроники. Немного отклоняясь от темы статьи, стоит упомянуть, что компанией Murata развивается технология Power MONO. Это позволит создавать мощные батареи керамических конденсаторов в том числе для использования в приводах электроавтомобилей. [13]. Так же стоит упомянуть тот факт, что цитируется статья о технологиях, казалось бы далекого 2009 года. Но часто бывает так, что технологии становятся известны в научном мире задолго до того, как они попадут в широкий доступ. Вероятно так произошло и с керамическими конденсаторами большой емкости.

Современная доступность и невысокая цена керамических конденсаторов с учетом их высоких характеристик диэлектрика позволяют вообще отказаться от применения электролитических конденсаторов в качестве хранилища электрической энергии. В частности для нашего решения. Например, керамический конденсатор P/N: GRM32ER60J227ME05K, производства Murata Electronics имеет емкость 220uF+15%, максимальное напряжение 6.3В, температурный диапазон -55°C ~ 85°C в SMD корпусе 1210 размером 3.2x2.5x2.8мм, цена ~1\$ за 1шт. Ссылка на сайт производитель: [14]. Такие конденсаторы нужно объединять в батареи для получения значений общей емкости, соизмеримой с электролитическими конденсаторами. Восемь таких конденсаторов обеспечат

емкость уже в 1760мкФ, и возможно использовать ее в качестве накопительной емкости С3 (см. Рисунок 3). А заряженная до напряжения 5В способна запасти электрическую энергию в размере:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{1760 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2}{2} = 22 \text{ мДж (мВт} \cdot \text{с)} \quad (3)$$

Применение керамических емкостей большой емкости имеет и еще одно важное преимущество – уменьшение массогабаритных показателей. Батарея таких емкостей занимает на печатной плате площадку всего 6.5x10мм. А для устройств работающих совместно с датчиками физических величин, особенно беспроводных, это очень важно. В качестве емкостей полумоста С1 и С2 стоит использовать обычные керамические конденсаторы, например P/N: CL21A106KPFNNNF, 10uF x 10V, 0805. Выбор рабочего напряжения емкостей диктуется выходным амплитудным напряжением источника энергии, а достаточность величины накопительной емкости должна быть подтверждена в ходе эксперимента. Кроме этого, должна быть произведена оценка скорости саморазряда накопительной емкости.

### Экспериментальная часть

Выбор конкретных моделей выпрямительных элементов, наличие самого индуктивного датчика позволяет нам собрать реальную схему и произвести оценку работы всех ее элементов. В качестве имитации зубчатого колеса можно использовать любую, похожую на реальное зубчатое колесо ДВС по конструкции и свойствам, модель из магнитного материала (колесо, зубья). В итоге нужно получить диаграмму скорости зарядки конденсаторов и разрядки на реальную нагрузку. Это позволяет оценить порядок накопленной полезной энергии и, соответственно, определить достаточно ли емкости выбранного хранилища для кратковременной работы, например микроконтроллера. Изменение воздушного зазора между датчиком и зубчатым колесом позволяет оценить влияние на прирост или уменьшение как уровней запаасаемой энергии, так и скорости ее нарастания. Измерение проводилось при помощи 2х канального электронного осциллографа *VELLEMAN PCSU-1000*, ссылка на сайт-производителя [15];

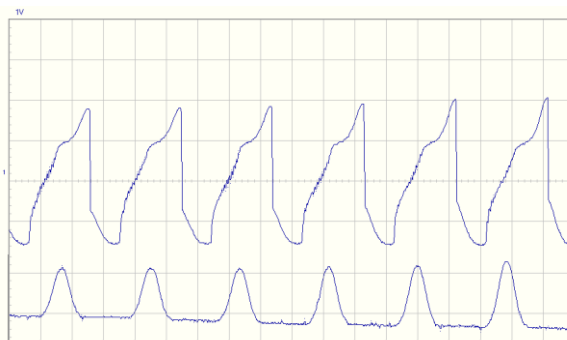


Рисунок 7 – Форма полезного сигнала датчика, воздушный зазор 1мм, нагрузка 1500 Ом и далее пульсации напряжения на одном из плеч полумоста, частота 70 Гц, развертка 1V/5mS.

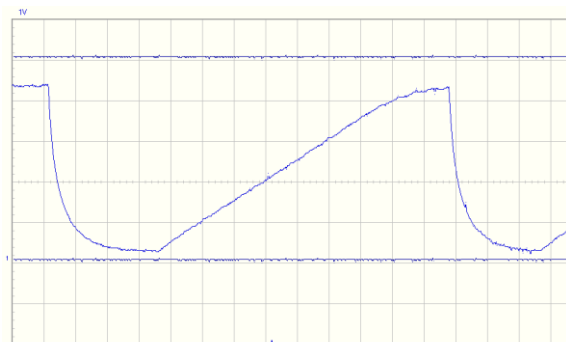


Рисунок 8 – Заряд емкости С3 со скоростью 1,02 В/с без нагрузки, разряд нагрузкой 200 Ом, воздушный зазор 2мм, развертка 1V/500mS.

Осциллограммы снимались для трех номиналов нагрузок: 200, 620 и 1500 Ом и для двух величин воздушного зазора 1 и 2мм. Верхний и нижние прямые лучи (если имеются) обозначают 0 и максимум питания (0..5В). Уменьшение воздушного зазора очевидно ведет к увеличению скорости зарядки накопительной емкости с 1,02 до 1,33 В/с (сравним рисунки 8 и 9). Если же сравнить рисунки 8 и 10, то во-первых видно что скорость зарядки, при отключенной нагрузке осталась прежней, а вот разряд нагрузкой 1500 Ом происходит уже не почти до полного нуля, а до значения в 2 В и продолжает удерживаться. Это означает,



что выпрямитель удерживает постоянную нагрузку. «Верхняя полка» означает, что постоянное напряжение конденсатора сравнялось с амплитудой сигнала, а перед приближением к этой границе и далее – хорошо видны пульсации напряжения. Особенно, при приближении на Рисунке 9.

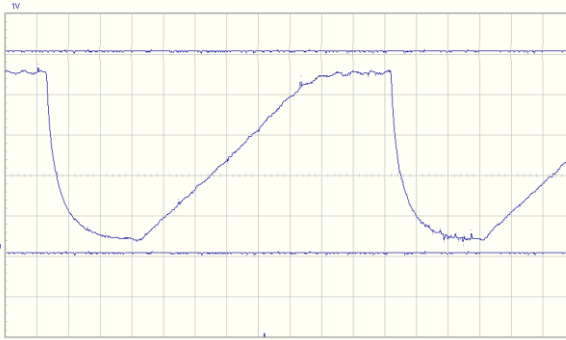


Рисунок 9 – Заряд емкости C3 со скоростью 1,33 В/с без нагрузки, разряд нагрузкой 200 Ом, воздушный зазор 1мм, развертка 1V/500mS.

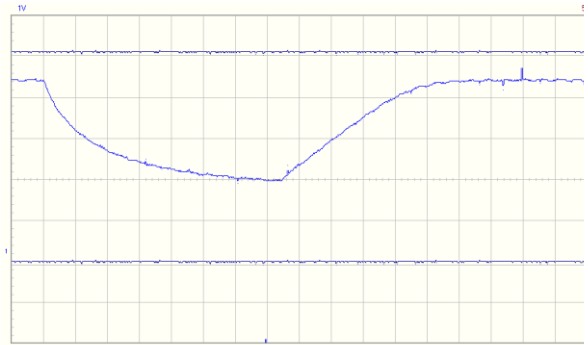


Рисунок 10 – Заряд емкости C3 со скоростью 1,02 В/с без нагрузки, разряд нагрузкой 1500 Ом, воздушный зазор 2мм, развертка 1V/500mS.

Диаграммы позволяют получить следующие экспериментальные данные:

- скорость нарастания напряжения на накопительном конденсаторе, зазор 1мм, составляет 1,33 В/с
- эта скорость соответствует уровню скорости нарастания электрической энергии на конденсаторе емкостью 1760мкФ – 1,6мВт/с
- скорость нарастания напряжения на накопительном конденсаторе, зазор 2мм, составляет 1,02 В/с, что значительно меньше показателя для зазора в 1мм
- влияние воздушного зазора нелинейно сказывается на энергетических характеристиках подобных устройств, и он должен выбираться исходя из минимально возможных значений
- скорость разрядки накопительных конденсаторов на активную нагрузку, зазор 1мм составляет для сопротивлений 200 Ом – 4 В/с, 620 Ом – 1,6 В/с, 1500 Ом – 1 В/с
- уровень энергии в накопительных конденсаторах – имеет порядок 18мВт · с при напряжении 4.5В
- скорость саморазряда накопительной емкости (без поступления энергии), не превышает 1мВ/с

### Заключение

В данной работе были проанализированы методы повышения эффективности выпрямления и накопления низкоэнергетических источников переменной полярности. Произведена оценка необходимости применения синхронного выпрямления полезной энергии для подобного рода устройств. Предложена наиболее оптимальная схема выпрямителя. Осуществлен подбор реальных компонентов для сборки физической схемы и осуществления экспериментальных измерений энергетических показателей датчика и выпрямителя. Специально в качестве источника взят не абстрактный генератор или модель, а реальный датчик положения коленчатого вала автомобиля. Такой подход позволяет выработать принципы решения целой серии задач в построении проводных и беспроводных датчиков. И конечно же оценить уровень полезной энергии, с которым мы имеем дело. Ведь для каждого вида и уровня полезной энергии схемотехнические решения могут отличаться. В качестве примера беспроводного устройства со сверхмалым потреблением приведена технология радиочастотной идентификации RFID.

Описанные методы, а также полученные экспериментальные измерения позволяют нам сделать следующие выводы:

- применение технологии (и контроллеров на их основе) синхронного выпрямления обосновано для источников энергии с чрезвычайно низкими уровнями полезной энергии (например, элемент Пельтье)

- использование специализированных низковольтных диодов с барьером шоттки позволяет говорить об уровне потерь на выпрямление на уровне 1%

- использование MLCC – многослойных керамических конденсаторов большой ёмкости, набранных в батарее – позволяет полностью заменить алюминиевые электролитические конденсаторы. При этом получить выигрыш в габаритах и характеристиках

- эти керамические конденсаторы имеют одни из лучших показателей ESR и добротности, по сравнению с другими конденсаторами

- полученные уровни полезной энергии, с использованием перечисленных методов повышения эффективности, позволяют улучшить энергетические, а значит и качественные характеристики устройств, которые могут быть построены на их основе.

### Литература

1. Сандип Лахири. RFID. Руководство по внедрению - The RFID Sourcebook / Дудников С.. — М.: Кудиц-Пресс, 2007. — 312 с. — ISBN 5-91136-025-X.
2. В.С.Леонтьев, Р.В.Петров, Н.А.Колесников, С.Т.Божков / Магнитоэлектрический датчик положения коленчатого вала // Вестник Новгородского Государственного Университета 2017 №7(105) - С.60 <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitoelektricheskiy-datchik-polozheniya-kolenchatogo-vala> (дата обращения: 26.06.2023)
3. Roman Petrov, Viktor Leontiev, Oleg Sokolov, Mirza Bichurin, Slavcho Bozhkov / Magnetolectric Automotive Crankshaft Position Sensor // Sensors 2020, 20(19), 5494; - P.8, <https://doi.org/10.3390/s20195494> (дата обращения: 26.06.2023)
4. Осколков В.Н. / Индуктивный стержневой датчик // Патент RU 11897 U1, Открытое акционерное общество "МОРИОН", 1999
5. Полупроводниковые приборы / Пасынков В. В., Чиркин Л. К. // Учебник для вузов. 6-е изд., Издательство «Лань», 2002. — С.65
6. Андреевская Т.М. Полный курс основы аналоговой схемотехники // Кафедра РЭ, МИЭМ, 2005 – С.41
7. Б. Грабовски. Справочник по электронике / Б. Грабовски — 2-е изд., испр. — М.: ДМК-Пресс, 2009 - с.286
8. CUS520, Schottky Barrier Diode Silicon Epitaxial, Toshiba Semicon. [https://toshiba.semiconstorage.com/info/CUS520\\_datasheet\\_en\\_20140414.pdf?did=7041&prodName=CUS520](https://toshiba.semiconstorage.com/info/CUS520_datasheet_en_20140414.pdf?did=7041&prodName=CUS520) (дата обращения: 26.06.2023)
9. Dabing Ma, Jianli Xing / The design of ideal diode // Conference IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification, ASID, 24-26 August 2012, Taipei, Taiwan <https://ieeexplore.ieee.org/document/6325307/authors#authors> (дата обращения: 26.06.2023)
10. Александр Щерба / Сдвоенный контроллер синхронного выпрямителя MP6922 // Журнал Силовая электроника, № 6'2015, Москва – С.49 [https://power-e.ru/power\\_supply/mp6922-ot-mps/](https://power-e.ru/power_supply/mp6922-ot-mps/) (дата обращения: 26.06.2023)
11. LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager <https://www.analog.com/en/products/ltc3108.html#product-overview> (дата обращения: 26.06.2023)

12. Иван Голубев / Обзор современных конденсаторов // СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА № 5 2006, Издательство СТА ПРЕСС, г. Санкт-Петербург, С.16  
<https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/44d/44ddc7884cdd59a62cedd689778a5f21/200605016.pdf>  
(дата обращения: 26.06.2023)
13. Соджи ТСУБОТА (Shoji TSUBOTA) Новая технология MLCC для производства керамических конденсаторов больших размеров // КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ • № 6 '2009 – С.12  
<https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-tehnologiya-mlcc-dlya-proizvodstva-keramicheskikh-kondensatorov-bolshih-razmerov>  
(дата обращения: 26.06.2023)
14. Murata Manufacturing Co., Ceramic Capacitors(SMD)  
<https://www.murata.com/en-global/products/productdetail?partno=GRM32ER60J227ME05%23>  
(дата обращения: 26.06.2023)
15. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=362986> (дата обращения: 26.06.2023)