

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный
исследовательский университет»
Механико-математический факультет

УДК 004.422.833

*Кафедра математического обеспечения
вычислительных систем*

**Разработка средств автоматизации программирования устройств
Интернета вещей на базе платформы SciVi**
Выпускная квалификационная работа бакалавра

Работу выполнил студент группы ПМИ-
1,2-2019 4 курса механико-
математического факультета
Лукьянов Александр Михайлович

«__» _____ 2023 г.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры МОВС
Рябинин Константин Валентинович

«__» _____ 2023 г.

Пермь 2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	3
1 Анализ наиболее популярных решений управления энергонезависимой памятью	6
1.1 Требования к системе управления энергонезависимой памятью	6
1.2 Стандартная библиотека	7
1.3 Библиотека EEPROMEx	7
1.4 Библиотека EEManager	10
1.5 Библиотека EEPROMWearLevel	11
1.6 Вывод	15
2 Разработка библиотеки менеджера EEPROM	16
2.1 Первая версия библиотеки	16
2.2 Уточнение требований к разрабатываемой библиотеке	16
2.3 Разработка структуры библиотеки	17
2.3.1 Общая структура библиотеки	17
2.3.2 Диаграмм классов библиотеки	20
2.3.3 Внешний интерфейс библиотеки. Класс EEPROM-переменной	20
2.3.4 Класс менеджера EEPROM	23
2.3.5 Хранение и поиск переменных в EEPROM	24
2.3.6 Класс для чтения и записи данных	25
2.4 Реализация библиотеки	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А	30

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация процесса разработки и отладки программ для микроконтроллеров и для созданных на их основе устройств интернета вещей (англ. internet of things, IoT) является крайне важной и острой задачей для разработчиков. Это вызвано, в первую очередь, ограниченностью интерфейсов микроконтроллеров для взаимодействия с пользователем. Кроме того, разработку программ для микроконтроллеров в значительной степени затрудняет отсутствие высокоуровневых средств отладки. С указанными проблемами, в частности, сталкивается платформа научной визуализации и визуальной аналитики SciVi, разработанная сотрудниками Пермского государственного национального исследовательского университета [1; 2].

Данная платформа использует микроконтроллеры для исполнения пользовательских алгоритмов. Эти алгоритмы передаются на микроконтроллеры и хранятся на них в виде онтологий, сжатых с помощью набора программных средств EON [3; 4]. В дальнейшем эти онтологии, представляющие алгоритмы, интерпретируются и исполняются на самих микроконтроллерах.

Целью выпускной квалификационной работы, в рамках которой выполнена данная научно-исследовательская работа, является разработка требуемых платформой SciVi программных средств для автоматизации программирования микроконтроллеров.

В научно-исследовательской работе рассматривается один из аспектов автоматизации работы описанной выше системы — сохранение необходимых для интерпретации онтологий данных в энергонезависимой памяти микроконтроллеров с целью повышения уровня отказоустойчивости системы.

Энергонезависимая память — особый вид запоминающих устройств, способный хранить данные при отсутствии электропитания. Такая память используется в составе вычислительных устройств, в том числе для хранения данных, необходимых для их инициализации, и

конфигурационных данных между их запусками.

Задача хранения конфигурационных данных при отсутствии электропитания особо остро стоит при работе с микроконтроллерами. Это обусловлено, во-первых, уязвимостью таких устройств к перебоям электропитания и, во-вторых, особенностями условий их использования: устройства с микроконтроллерами обычно создаются для автономной работы, поэтому после временного отключения питания они должны самостоятельно восстанавливать своё прошлое состояние. В микроконтроллерах для решения этой задачи обычно используются электрически стираемые перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (ЭСППЗУ, англ. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM) — вид устройств энергонезависимой памяти, позволяющих электрическим импульсом стереть сохранённые данные, а затем, при необходимости, записать новые [5; 6].

В платформе SciVi уже реализовано сохранение информации в EEPROM, однако сделано это за счёт стандартных средств. Их низкоуровневость и ограниченность не позволяют использовать EEPROM удобно и, главное, расширять его применение хранением новых данных.

В основе данной научно-исследовательской работы лежит поиск решения указанных проблем в применении стандартных средств использования EEPROM микроконтроллеров.

Цель работы: разработать программный модуль с высокоуровневым интерфейсом, позволяющий удобно и без необходимости ручной настройки сохранять и считывать информацию из EEPROM микроконтроллеров, в соответствии с требованиями платформы SciVi.

Объект исследования данной работы: автоматизация периферийных вычислений.

Предмет исследования: средства платформы SciVi для организации онтологически-управляемых периферийных вычислений.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Составить требования к необходимому программному модулю.
2. Исследовать существующие средства для работы с энергонезависимой памятью и, в частности, EEPROM

микроконтроллеров.

3. При возможности, выбрать одно из таких средств для использования в качестве основы разрабатываемого модуля.
4. Разработать программный модуль для работы с EEPROM микроконтроллеров, соответствующий всем поставленным требованиям.
5. Провести тестирование и отладку разработанного программного модуля.
6. Интегрировать разработанный модуль в платформу SciVi.

1 Анализ наиболее популярных решений управления энергонезависимой памятью

1.1 Требования к системе управления энергонезависимой памятью

В платформе SciVi в основном применяются микроконтроллеры серии ESP8266. А для их программирования используются инструменты среды разработки Arduino IDE, позволяющие программировать микроконтроллеры, используя язык программирования C++, а также специальное дополнение к этой среде для работы с ESP8266 [7], содержащее, в частности, набор „стандартных“ библиотек.

Таким образом, необходимый программный модуль должен представлять собой библиотеку классов языка программирования C++, может использовать стандартный набор библиотек Arduino IDE и указанного дополнения к ней. Такая библиотека должна:

1. Предоставлять пользователю возможность сохранять и считывать данные из EEPROM микроконтроллера. При этом:
 - 1.1. Данные могут иметь произвольную структуру.
 - 1.2. Доступ к ним должен производиться по некоторым идентификаторам, уникальным для различных данных и без необходимости ручных манипуляций с адресами EEPROM со стороны пользователя.
2. Автоматически определять факт наличия в EEPROM данных с заданным идентификатором, определять адрес для записи новых данных, сохранять в EEPROM метаданные о хранящихся данных для их использования после перезапуска микроконтроллера.
3. Минимизировать количество операций записи в EEPROM, т.к. каждая ячейка такой памяти может быть перезаписана ограниченное количество раз (обычно производители гарантируют от 100.000 до 1.000.000 циклов перезаписи), после чего выходит из строя.
4. Выполняться на микроконтроллерах серии ESP8266 и, по возможности, на платформе Arduino, так как эта платформа

является наиболее популярной и распространённой.

Ключевым требованием является полная автоматизация работы с адресами EEPROM, это необходимо для создания возможности использования EEPROM в различных независимых программных модулях. В противном случае, таким модулям понадобилось бы каким-либо образом обмениваться информацией об используемых ими адресах для избежания чтения и записи разными модулями в одни и те же ячейки EEPROM.

1.2 Стандартная библиотека

В стандартный набор библиотек Arduino IDE уже входит библиотека для работы с EEPROM [8]. Как и SciVi в данный момент, большая часть проектов, хранящих какие-либо данные в EEPROM, ограничивается использованием этой библиотеки. Однако она предоставляет только простые функции, такие как записать и считать байт по указанному адресу. Позже в неё были добавлены функции для чтения и записи данных произвольных типов, но также только по явно указанному адресу. Очевидно, это делает стандартную библиотеку нарушающей все поставленные требования, однако её функции можно использовать в качестве низкоуровневого интерфейса EEPROM в разрабатываемой библиотеке. Кроме указанных, стандартная библиотека содержит функцию-обёртку вокруг функции записи, производящую фактическую перезапись данных только тогда, когда они отличаются от хранящихся по указанному адресу в данный момент. В дальнейшем, в большинстве случаев, разумно использовать для записи именно эту функцию с целью уменьшения износа EEPROM.

1.3 Библиотека EEPROMEx

Библиотека EEPROMEx (от англ. Extended — Расширенный) — одна из первых разработок для работы с EEPROM микроконтроллеров в среде Arduino IDE [9]. Данная библиотека была создана раньше, чем описанная выше, поэтому часть предоставляемых ими возможностей совпадает, однако реализованы они независимо друг от друга. EEPROMEx содержит функции для чтения и записи в EEPROM данных некоторых стандартных типов: целочисленных беззнаковых чисел длиной в 8, 16 и

32 бита и 32-х и 64-х битных чисел с плавающей точкой. В библиотеке также содержатся функции для чтений и записи отдельных битов и, как и в стандартной библиотеке, аналогичные функции для работы с данными пользовательских типов и аналоги всех функций записи, производящие запись только при отличии данных. Кроме того EEPROMEx содержит и уникальную возможность — с помощью класса EEPROMVar связывать одним объектом переменные в коде программы и данные в EEPROM (их адреса). Причём эти адреса назначаются автоматически, что косвенно соответствует части требований, описанных в пункте 1.1. Рассмотрим пример использования EEPROMVar, демонстрирующий большую часть возможностей данного класса:

```
1 EEPROMVar<float> eepromFloat(5.5);  
2  
3 floatVar.restore();  
4  
5 floatVar = 10.5;  
6  
7 float input = floatVar;  
8  
9 floatVar.save();
```

Как можно увидеть в строке 1 примера, при создании объекта класса EEPROMVar указывается тип данных, которые необходимо хранить (в примере — float), и значение по умолчанию, которое передаётся в конструктор в виде параметра (в примере — 5.5). Метод restore, вызываемый в строке 3, считывает из EEPROM данные, соответствующие данному объекту, и сохраняет в него эти данные. В строке 5 демонстрируется возможность изменения хранимых данных с помощью оператора присвоения, причём в качестве левостороннего значения выступает объект класса EEPROMVar, а правостороннего — значение хранимого объектом типа пользовательских данных. Это достигается за счёт переопределения оператора присвоения для данного класса. В строке 7 показан обратный переход: объект класса EEPROMVar может быть переведёт в значение хранимого им типа. В последней строке показан вызов метода save, сохраняющего значение, хранящееся в объекте, в EEPROM.

Также для класса EEPROMVar определены некоторые операторы, такие как оператор инкремента (++), присвоения со сложением (+=) и другие операторы, связанные с изменением хранимого значения. Такие

операторы вызывают в своём теле аналогичные для хранимых данных, что, разумеется, требует их существования.

Описанный класс механизм имеет ряд значительных недостатка. Первый из них заключается в способе связывания данных и адреса, по которому они хранятся в EEPROM. Обычно для этого данным выдаются уникальные имена, и каким-либо образом сохраняется информация о том, что данные с определённым именем находятся по определённому адресу. Как можно увидеть в приведённом примере, при использовании библиотеки `EEPROMEx` присвоения имён не происходит. В этом случае данные располагаются в EEPROM друг за другом в порядке создания объектов класса `EEPROMVar`. Таким образом, для того, чтобы гарантировать, что при перезапуске микроконтроллера объекты класса `EEPROMVar` связываются с одними и теми же адресами в EEPROM, необходимо обеспечивать создание этих объектов в строго одинаковом порядке при каждом включении устройства. Эта работа ложится на плечи конечного пользователя — разработчика программы для микроконтроллера. Причём даже в случае, если разработчик не применяет описываемый класс напрямую, но он используется в импортируемых итоговой программой библиотеках.

Второй проблемой является невозможность определения первого вызова конструктора для каких-либо пользовательских данных, то есть момента, в который эти данные отсутствуют в EEPROM, и необходимо записать значение по умолчанию. И вновь разработчик конечной программы должен каким-либо образом самостоятельно определять, когда после создания объекта необходимо проводить сохранение в EEPROM значения по умолчанию, а когда наоборот считывание уже хранящегося в памяти значения.

В конечном итоге можно сделать вывод, что библиотека `EEPROMEx` частично соответствует предъявляемым требованиям, но при этом её использование нельзя назвать удобным, так как оно требует от конечного пользователя большой работы, которая могла бы быть автоматизирована. При этом идея использовать переопределение операторов для получения и изменения пользовательских данных в EEPROM является крайне удачной и удобной в использовании. Такой вариант предпочтительнее

использования для тех же целей отдельных методов, так как, во-первых, позволяет пользователю библиотеки писать меньше кода и, во-вторых, позволяет ему думать об объекте, описывающем данные в EEPROM, как о самих этих данных. В дальнейшем при разработке собственной библиотеки имеет смысл реализовать аналогичный интерфейс.

1.4 Библиотека EEManager

Сравнительно недавно была опубликована новая библиотека для работы с EEPROM — EEManager [10]. Она имеет открытый исходный код (опубликован под лицензией MIT [11]) и документацию на русском языке. Так как данная библиотека значительно новее предыдущей рассмотренной, и в момент её создания уже существовала описанная выше версия стандартной библиотеки, EEManager используют её возможности, в первую очередь - функции-обёртки, уменьшающие износ памяти.

Данная библиотека имеет следующие преимущества:

- Реализован механизм отложенной записи: по умолчанию данные записываются в EEPROM с заданной задержкой после последней команды на запись. Использование такого подхода имеет смысл в ситуациях, когда данные должны перезаписываться много раз за короткий промежуток времени, в действительности же, с таким механизмом данные в EEPROM будут записаны только в последний раз, что значительно замедлит износ памяти. В то же время этот механизм имеет значительный недостаток: если потеря питания произойдёт после команды записи, но до истечения задержки, новые данные записаны не будут. Это делает использование такого механизма оправданным только в устройствах, для которых гарантия записи не является обязательной и точность восстановления состояния после потери питания не представляет критической важности.
- Библиотека также реализует „механизм ключа первой записи“. Вместе с каждым блоком данных в EEPROM хранится специальный однобайтовый ключ. При обращении к блоку данных пользователь указывает придуманный им ключ, который не должен изменяться от запуска к запуску, а из EEPROM

считывается записанное значение ключа. Если они совпадают, значит необходимые данные уже находятся в EEPROM и их необходимо только считать, иначе данные никогда не были записаны, в этом случае данные должны быть сохранены в EEPROM.

Работа с библиотекой осуществляется следующим образом:

1. Создаётся переменная в энергонезависимой памяти, значение которой необходимо хранить в EEPROM.
2. Создаётся специальный объект, описывающий блок данных EEPROM (некоторый аналог EEPROMVar из библиотеки EEPROMEx). При этом пользователь указывает переменную в энергонезависимой памяти, значение которой необходимо хранить, и адрес в EEPROM, начиная с которого должна быть записана эта переменная.
3. С помощью механизма ключа первой записи либо в EEPROM записывается значение переменной по умолчанию, либо наоборот сохранённое в EEPROM значение считывается в переменную.
4. В дальнейшем, по необходимости, текущее значение переменной записывается в EEPROM. Для этого необходимо сначала обновить значение энергонезависимой переменной, с которой связан описанный выше объект, а затем записать это новое значение в EEPROM. Чтобы сделать это, можно воспользоваться одним из двух методов: для немедленной записи и для запуска таймера записи с задержкой.

Несмотря на указанные преимущества перед стандартной библиотекой, библиотека EEManager так же не может быть использована в готовом виде, так как обращение к блокам данных в ней производится только по их адресам. Это делает невозможным независимое использование данной библиотеки из различных программных модулей.

1.5 Библиотека EEPROMWearLevel

В большинстве микроконтроллеров, в частности, на платформе Arduino, используется EEPROM с возможностью перезаписи отдельного байта, таким образом одни ячейки памяти могут изнашиваться быстрее

других. Для уменьшения скорости общего износа памяти имеет смысл как можно равномернее распределять количество циклов перезаписи по всем ячейкам EEPROM. Классический способ такого распределения — использование кольцевого буфера [12].

Идея этого метода заключается в перезаписи данных не по тому же адресу, а по новому, с некоторым сдвигом вперёд. Когда такой сдвиг становится невозможным из-за недостаточного объёма памяти, запись снова производится по первоначальному адресу. При этом, чтобы иметь доступ к данным, необходимо постоянно хранить их текущий адрес или счётчик циклов перезаписи, и определять адрес по его значению. В самом простом случае, если все данные хранятся в одном блоке, это можно сделать, умножив номер цикла на размер этого блока данных. Однако, если хранить их по фиксированному адресу в EEPROM, соответствующие ячейки будут изнашиваться быстрее, что делает использование кольцевого буфера бессмысленным.

Один из способов эффективной реализации счётчика — использование двух кольцевых буферов: одного для данных, второго — для счётчика. Если при этом каждый раз при прохождении целого цикла записи (записи данных по изначальному адресу) для второго буфера, заполнять его нулевыми значениями, то после перезапуска микроконтроллера в этом буфере можно найти актуальное значение счётчика тривиальным образом — это будет последнее ненулевое значение в нём.

Другой способ основывается на использовании ещё одной особенности EEPROM микроконтроллеров: после стирания байта все его биты устанавливаются равными единице, и стандартная библиотека Arduino IDE предоставляет возможность устанавливать отдельным битам нулевое значение, без стирания всего байта. За счёт этого можно хранить счётчик в своеобразной унарной системе счисления: десятичное значение счётчика равно количеству нулей в его побитовой записи. Это позволит стирать ячейки EEPROM, хранящие счётчик, только при прохождении полного цикла записи в буфере данных.

Кольцевой буфер с последним из описанных механизмом эффективного счётчика реализует открытая библиотека

EEPROMWearLevel [13] (опубликована под лицензией Apache 2.0 [14]). EEPROMWearLevel предоставляет интерфейс, аналогичный стандартной библиотеке, за исключением функции инициализации, в которую в данной библиотеке необходимо подать требуемое количество блоков EEPROM, дополняя этот интерфейс возможностью обращения к блокам данных по их индексам. Указанное отличие в функциях инициализации вызвано тем, что данная библиотека создаёт отдельный кольцевой буфер для каждого блока данных, при этом весь объём EEPROM делится на буферы поровну между всеми хранящимися блоками данных. Такое решение является неэффективным в случае хранения блоков разного размера. В худшем случае размер одного или нескольких блоков может превышать размеры выделенного буфера, однако такой случай обрабатывается библиотекой и приведёт к выводу соответствующей ошибки и отмене записи такого блока. Целостность других блоков при этом нарушена не будет.

Индексы блоков данных, используемые в этой библиотеке для доступа к ним, можно считать уникальными идентификаторами, описанными в требованиях, приведённых в начале главы. Однако необходимость общей инициализации с указанием суммарного количества блоков данных делает невозможным применение данной библиотеки в независимых программных модулях. Такой необходимости можно избежать, например, введя иерархическую структуру разделения EEPROM: сначала разделить весь объём EEPROM на крупные разделы (по одному или несколько на модуль), а затем внутри каждого из них — на кольцевые буферы, аналогично уже реализованному принципу. Чтобы гарантировать, что потребности всех модулей в использовании EEPROM учтены, необходимо:

- Либо проводить разделение EEPROM только после того, как все модули (посредством вызова некоторой специальной функции) сообщат библиотеке управления EEPROM их потребности в использовании EEPROM. Однако такой подход требует обязать конечного пользователя вызывать функцию инициализации библиотеки управления EEPROM строго после инициализации всех модулей, которым она необходима. А разработчиков этих модулей — вызывать функцию, описанную выше, при их

инициализации. Такой подход, очевидно, является неудобным, так как требует от конечного пользователя знания о том, необходимо ли используемым им модулям хранить данные в EEPROM.

- Либо реализовать возможности динамического добавления новых разделов EEPROM, при этом уменьшая размер уже созданных разделов. Такой подход лишён недостатков первого, однако его использование значительно усложнит работу библиотеки из-за необходимости уменьшения размеров каждого кольцевого буфера при добавлении нового раздела и, возможно, сдвига данных, если эти данные в момент добавления выходят за уменьшенные границы буфера.

Можно заключить, что существует возможность дополнения данной библиотеки таким образом, чтобы она удовлетворяла всем поставленным требованиям. В то же время данная библиотека не может напрямую использоваться с микроконтроллерами ESP8266, так как она содержит платформозависимый код, выполнение которого возможно только микроконтроллерами с архитектурой AVR, к которым ESP8266 не относится. Кроме того, микроконтроллеры ESP8266 используют иной тип EEPROM — flash память [15; 16], которая не позволяет стирать и перезаписывать отдельные байты, а только их большие группы (обычно от 512 байт) [17]. Основное назначение этой памяти в данных микроконтроллерах — хранение исполняемых программ, однако её часть специально выделена для хранения пользовательских данных. При этом в ходе анализа исходного кода стандартной библиотеки [15] для работы с EEPROM для ESP8266 было установлено, что для данных микроконтроллеров размер такой группы байт равен всему объёму flash-памяти, выделенному для пользовательских данных.

Таким образом, оказалось, что использование в программах для ESP8266 любых механизмов, подобных кольцевым буферам, не только не приводит к замедлению износа памяти, но и способно ускорять её износ из-за дополнительных операций перезаписи счётчиков и других метаданных.

1.6 Вывод

В ходе первого этапа работы были изучены особенности устройства и работы EEPROM. Были составлены требования к программному модулю для работы с EEPROM микроконтроллеров. С учётом этих требований были проанализированы существующие в открытом доступе решения. На основе анализа было принято решение о разработке собственного модуля, а также об использовании в нём стандартной библиотеки для работы с EEPROM и целесообразности заимствования некоторых механизмов из других библиотек.

2 Разработка библиотеки менеджера EEPROM

2.1 Первая версия библиотеки

После анализа существующих решений, была разработана собственная библиотека. Её исходный код находится в открытом доступе в специальной репозитории, вместе с примерами использования и тестирующими библиотеку программами для микроконтроллеров [18]. Разработанная библиотека основывалась только на библиотеке EEManager, которая на тот момент казалась наиболее удачной из рассмотренных библиотек. Однако после реализации и тестирования было установлено, что логика созданной библиотеки работает в соответствии с поставленными требованиями, но её интерфейс проявил является крайне неудобным и недостаточно высокоуровневым. Общий вид этого интерфейса был продиктован идеей сохранить частичную обратную совместимость с библиотекой EEManager и переиспользовать её код, что привело к предоставлению пользователю недостаточно высокоуровневых функций.

Основным понятием, которой оперировала данная библиотека является EEPROM-переменная — сущность (программный объект), описывающая некоторый единый блок пользовательских данных, хранимых в EEPROM. В дальнейшей работе также использовалось это понятие.

2.2 Уточнение требований к разрабатываемой библиотеке

После признания первой версии библиотеки неудачной, было принято решение о разработке второй со следующими изменениями:

1. Объединить одной сущностью данные в оперативной памяти и объекты, описывающие связанные с ними данные в EEPROM. При использовании такой сущности первоначальное считывание значения из EEPROM (или запись в него значения по умолчанию) возможно производить в конструкторе класса, соответствующего такой сущности. Дальнейшее же получение из неё пользовательских данных и их обновление в EEPROM

реализовать за счёт переопределения операторов, аналогично классу EEPROMVar из библиотеки EEPROMEx. Это позволит одновременно (с точки зрения пользователя) работать и с данными в оперативной памяти, и с их представлением в EEPROM.

2. Реализовать механизм отложенной записи для всего EEPROM в целом, а не для каждой EEPROM-переменной по отдельности.
3. Завязать такой механизм на количестве обращений на запись, а не на реальном времени, как в EEPROMManager.
4. Реализовать возможность немедленного обновления данных в EEPROM в случае необходимости.

На основе дополненного списка требований к библиотеке можно составить диаграмму прецедентов работы с ней. Она представлена на рисунке 2.1.

На диаграмме отсутствует прецедент удаления переменной в связи с тем, что, как писалось выше, основная цель применения EEPROM в программах для микроконтроллеров — сохранение состояния устройства между его запусками. Как правило, для запуска микроконтроллера с одной и той же программой необходимы одни и те же данные, следовательно, удалять их нет необходимости.

2.3 Разработка структуры библиотеки

2.3.1 Общая структура библиотеки

В соответствии с общепринятым стилем, библиотека должна быть написана с использованием объектно-ориентированной парадигмы программирования. Основное понятие для разрабатываемой библиотеки — EEPROM-переменная, следовательно, в ней должен содержаться класс, соответствующий этому понятию. Кроме того, необходим отдельный класс, оперирующий EEPROM в целом. Назовём его классом менеджера памяти. К этому классу должны обращаться EEPROM-переменные для их поиска или добавления в память и обновления их значений.

Важно учитывать, что стандартные библиотеки EEPROM для различных микроконтроллеров обычно работают схожим образом, но всё же могут иметь отличия. В частности незначительно отличаются

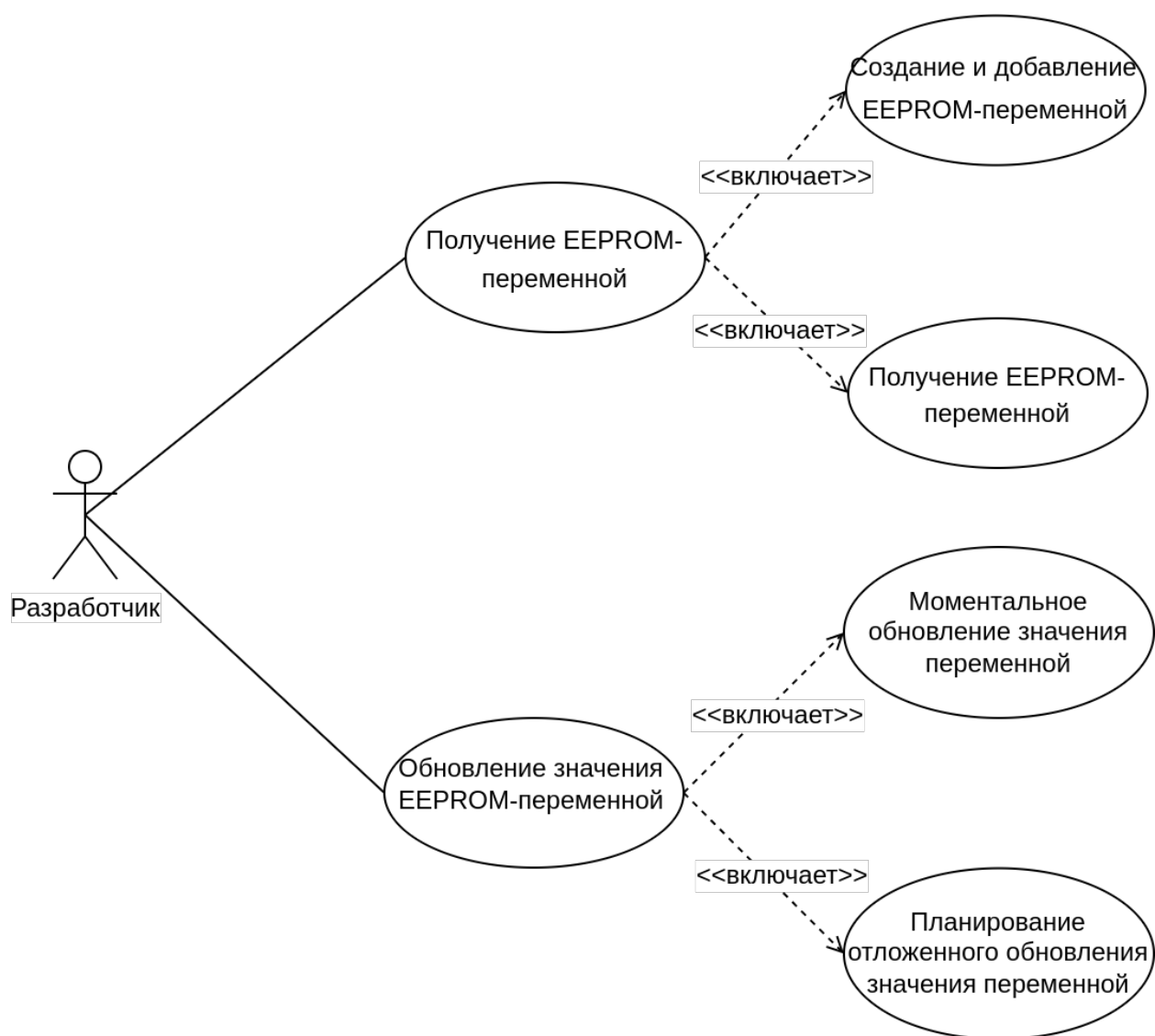


Рисунок 2.1 – Диаграммы прецедентов использования библиотеки

такие библиотеки и для целевых платформ данной работы — Arduino и ESP8266. В следствии этого необходимо вынести все операции, использующие функции этих библиотек в отдельную сущность с тем, чтобы была возможность легко её изменить для использования других микроконтроллеров. Удобнее всего это сделать, определив абстрактный класс, предоставляющий унифицированные методы-обёртки над стандартными функциями, и создав конкретные реализации такого класса для различных микроконтроллеров. Этот же класс должен реализовывать механизмы уменьшения износа памяти, так как они могут быть различными для различных микроконтроллеров. Такой подход также позволит легче адаптировать разрабатываемую библиотеку для использования с абсолютно другими микроконтроллерами.

Для хранения EEPROM-переменных было решено использовать механизм, схожий с механизмами, используемыми в файловых системах. В описание каждой переменной включается адрес следующей, либо специальное значение, обозначающее, что данная переменная является последней в разделе. Адрес первой же переменной является константой и не изменяется при перезапуске устройства.

Также в энергонезависимой памяти стоит хранить специальное проверочное значение, показывающее, был ли менеджер инициализирован в EEPROM, и, в случае, если не был, инициализировать его. Причём имеет смысл объявить два таких значения, оба из которых свидетельствуют о том, что менеджер инициализирован, но одно из них используется в случае, если в EEPROM была объявлена хотя бы одна переменная, в противном случае, используется второе значение. Использование такого механизма необходимо для избежания чтения „мусорных“ данных, находящихся в EEPROM до первого использования менеджера. Также изменение этого значения в последующих версиях библиотеки можно использовать для принудительной переинициализации менеджера в случае изменения структуры хранения данных при выходе новой версии.

Принудительная переинициализация менеджера также требуется и при перепрошивке микроконтроллера в противном случае в энергонезависимой памяти будут накапливаться неиспользуемые переменные от предыдущих программ, загруженных в устройство. Arduino IDE автоматически создаёт константы, описывающие время компиляции программы и доступные из её кода. Это время можно также сохранять в EEPROM и при запуске микроконтроллера проверять, совпадает ли время компиляции текущей программы с сохранённым временем. Если они отличны, переинициализировать менеджер, считая, что больше в EEPROM нет сохранённых переменных. Для хранения времени компиляции оптимально использовать формат Unix time — количество секунд, прошедших с момента времени 00:00:00 1 января 1970 года, обычно хранящееся в виде 4-х байтного знакового целого числа. Такой формат является наилучшим, так как позволяет хранить время используя небольшой объём памяти, что является критичным, с учётом ограниченности объёмов EEPROM.

Логическая схема размещения данных в EEPROM показана на рисунке 2.2.

Для идентификации EEPROM-переменных было решено использовать произвольные строковые выражения — имена. Причём хранение в энергонезависимой памяти имён целиком может привести к её большому расходу, если имена будут достаточно длинными. Чтобы избежать этого, было принято решение, хранить в памяти результат вычисления некоторой хеш-функции от имени переменной. Такие значения всегда имеют фиксированную длину, в следствии чего объём используемой памяти будет всегда предсказуем.

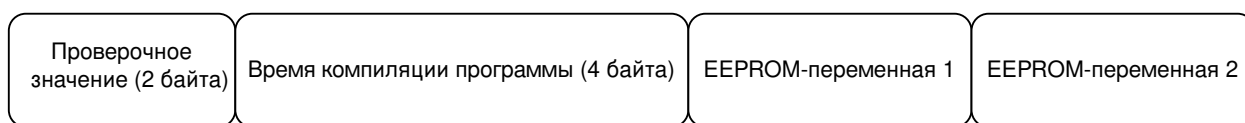


Рисунок 2.2 – логическая схема размещения данных в EEPROM

2.3.2 Диаграмм классов библиотеки

По итогам разработки структуры библиотеки была создана её диаграмма классов представленная на рисунке 2.3.

2.3.3 Внешний интерфейс библиотеки. Класс EEPROM-переменной

Пользователю для использования должен быть доступен всего один класс EEPROMVar, описывающий EEPROM-переменную. Данный класс является шаблонным, и его параметр типа определяет тип хранящихся пользовательских данных.

Этот класс имеет следующие методы

1. Конструктор. Он принимает в качестве аргументов имя переменной и её значение по умолчанию. Если переменная с таким именем уже существует, её значение считывается из энергонезависимой памяти и сохраняется в создаваемый объект, иначе в EEPROM создаётся новая переменная и в неё записывается значение по умолчанию.
2. Update — запланировать запись нового значения в EEPROM. Метод имеет две перегрузки: не принимающую аргументов —

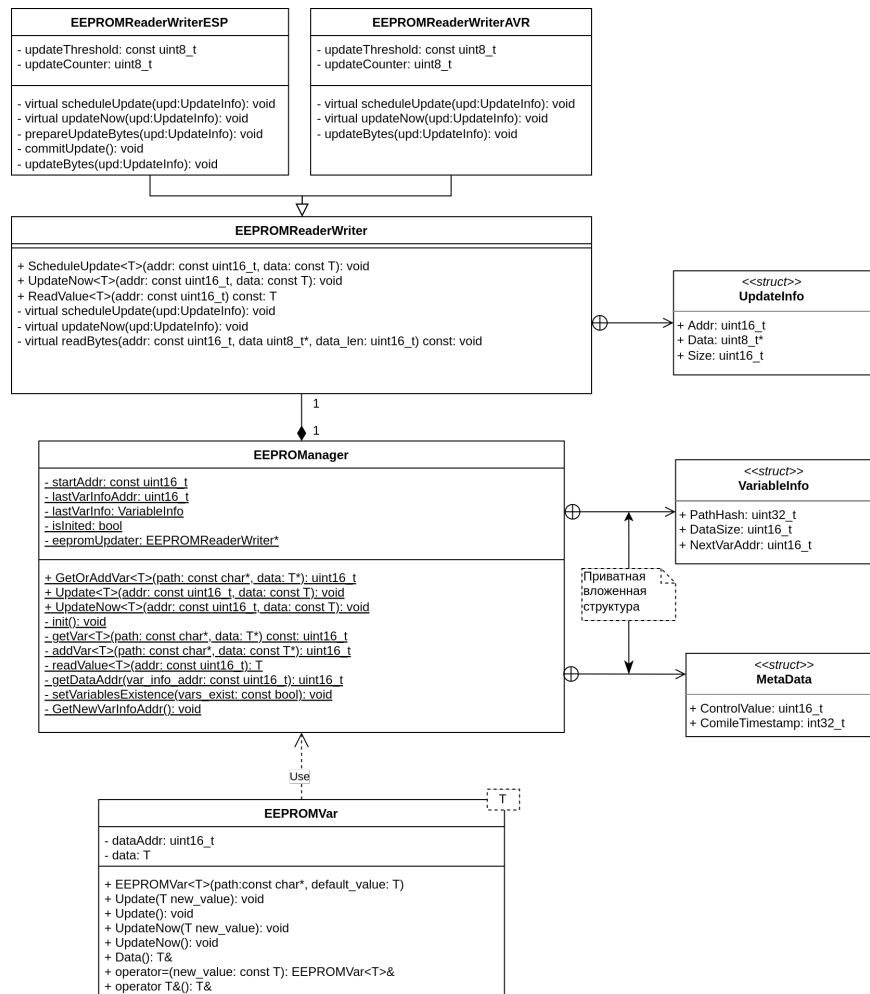


Рисунок 2.3 – Диаграмма классов библиотеки

для записи текущего значения пользовательских данных, и принимающая новое значение для этих данных, которая планирует запись этого нового значения.

3. `UpdateNow` — метод для немедленного обновления значения в EEPROM. Так же имеет две перегрузки аналогично предыдущему методу.
4. `Data` — метод, возвращающий по ссылке пользовательские данные, хранящиеся объектом.
5. Оператор присваивания (`„=“`). Работает аналогично методу `Update`, принимая новое значение пользовательских данных в качестве правостороннего значения. В отличие от аналогичного оператора класса `EEPROMVar` библиотеки `EEPROMEx`, данный сам производит (отложенную) запись новых данных, без необходимости отдельного вызова метода записи.

6. Оператор приведения объекта к типу хранящихся в нём пользовательских данных. Возвращает текущее значение хранимых данных, причём делает это по ссылке, как и метод `Data`.

В виде полей данный класс хранит сами пользовательские данные и адрес в EEPROM для их обновления.

Можно привести следующий пример использования класса `EEPROMVar`:

```
1 EEPROMVar<uint16_t> int_var("int_var", 1);
2
3 int_var = int_var + 1;
4
5 int_var.UpdateNow();
6
7 EEPROMVar<UserClass> custom_data("custom_data", UserClass());
8
9 custom_data.Data().UpdateField();
10
11 custom_data.Update();
12
13 custom_data = custom_data.Data().UpdateField();
```

1. Сначала пользователь объявляет EEPROM-переменную. Её значение либо считывается из EEPROM, либо наоборот сохраняется в него.
2. Пользователь изменяет значение EEPROM-переменной. Значение в объекте изменяется немедленно, в энергонезависимой памяти — с помощью механизма отложенной записи.
3. При необходимости, пользователь может в любой момент немедленно обновить значение в EEPROM.
4. Пользователь может объявить EEPROM-переменную, хранящую более данные более сложных пользовательских типов (классов или структур). В примере — класс `UserClass`.
5. Пользователь получает хранящееся значение сложного вызовом метода `Data` и затем вызывает у него некоторый метод, изменяющий значения его полей — `UpdateField`. В таком случае изменятся их значения изменятся только в оперативной памяти, так как, в отличие от пункта выше, оператор „=“ не вызывается. В таком случае для обновления значения в EEPROM пользователь

может идти различными путями:

- Вручную вызвать метод Update или UpdateNow у объекта EEPROM-переменной.
- При возможности реализовать метод UpdateField таким образом, что бы он возвращал ссылку на изменённый объект. В таком случае можно его использовать как показано в троке 13 примера.
- Также существует вариант создания временный объект того же типа, что и данные, хранимые EEPROM-переменной, с последующими изменением этого объекта и записью в EEPROM уже этого, временного, объекта. Однако такой вариант проигрывает предыдущим и практически не имеет смысла.

2.3.4 Класс менеджера EEPROM

Данный класс (EEPROMManager) предоставляет методы для поиска переменных в EEPROM по их именам, создания новых переменных и обновления хранимых ими значений. EEPROMManager не используется пользователем напрямую. Его методы вызываются объектами класса описанного выше.

Во-первых данный класс содержит две встроенные структуры:

- VariableInfo. Эта структура хранит метаинформацию о EEPROM-переменной в EEPROM: хеш-значение (CRC32) имени переменной, размер хранящихся пользовательских данных, адрес в EEPROM описания следующей переменной (при отсутствии следующей переменной равен нулю). Физически в энергонезависимой памяти всегда хранится такая структура, а начиная со следующего адреса сами пользовательские данные, описываемые структурой.
- MetaData — Общие мета-данные об EEPROM. Также сохраняет в энергонезависимой памяти и включает в себя описанные в пункте 2.3.1 специальное проверочное значение и временную метку времени компиляции загруженной в микроконтроллер программы.

К публичным методам класса относятся:

- `GetOrAddVar`. Метод находит переменную в EEPROM по её имени или создает новую.
- `Update` — Планирует обновление данных в EEPROM.
- `UpdateNow` — Немедленно обновляет пользовательских данные.

Также в классе содержатся приватные методы:

- `init` — Инициализирует менеджер. Читает мета-данные о сохраненных в EEPROM данных или записывает эту информацию, если это первый запуск.
- `getVar` — Получает адрес и данные переменной по её имени.
- `addVar` — Добавляет новую переменную в EEPROM и возвращает её адрес.
- `readValue` — Считывает данные пользовательских типов из EEPROM.
- `getDataAddr` — Получает адрес данных переменной по адресу её мета-информации.
- `setVariablesExistence` — Записывает в EEPROM информацию о добавлении первой переменной, если до этого переменных не существовало.
- `getNewVarInfoAddr` — Получает адрес для записи новой переменной.

И поля:

- `startAddr` — Начальный адрес EEPROM для управления данными.
- `lastVarInfoAddr` — Адрес мета-данных последней записанной переменной.
- `lastVarInfo` — Сами такие мета-данные. Используются при добавлении новой переменной: в них обновляется адрес следующей переменной, так как теперь она существует.
- `isInitd` — Значение, указывающее, был ли инициализирован менеджер.

2.3.5 Хранение и поиск переменных в EEPROM

В соответствии с описанием структуры `VariableInfo`, в EEPROM данные о каждой переменной хранятся в виде, представленном в таблице

2.1.

Таблица 2.1 – Мета-данные EEPROM-переменной

Размер данных	Сдвиг от начального адреса	Название поля	Описание
4 байта	0 байт	nameHash	Хэш-значение имени переменной. В данный момент используется хэш-функция CRC32 [19].
2 байта	4 байта	dataSize	Размер данных, хранящихся в переменной.
2 байта	6 байт	nextVarAddr	Адрес следующей переменной.
Зависит от типа данных	8 байт	data	Пользовательские данные, хранимые переменной.

2.3.6 Класс для чтения и записи данных

Данный класс (EEPROMReaderWriter) является прослойкой между классом-менеджером и стандартной библиотекой для работы с EEPROM. Он призван изолировать их конкретные реализации от менеджера, предоставляя ему унифицированный интерфейс из трёх методов:

- ScheduleUpdate — Запланировать обновление данных произвольного типа по некоторому адресу.
- UpdateNow — Немедленное обновление данные произвольного типа в EEPROM.
- ReadValue — Чтение данных произвольного типа из EEPROM.

Каждый из таких методов переводит указатель на полученные данные произвольного типа в тип указателя на отдельный байт и в таком виде передаёт эти данные в соответствующий приватный метод. Такие методы являются абстрактными и требуют реализации для конкретных микроконтроллеров. Список абстрактных методов:

- scheduleUpdate — Запланировать обновление данных в EEPROM.

- `updateNow` — Немедленно обновить данные в EEPROM.
- `readBytes` — Чтение данных из EEPROM.

В рамках проведённой работы были разработаны реализации этого класса для целевых микроконтроллеров — платформы Arduino и ESP8266.

2.4 Реализация библиотеки

Библиотека была реализована в соответствии с представленной диаграммой. В данном отчёте не приводятся детали реализации отдельных методов, однако исходный код разработанной библиотеки находится в открытом доступе в специальной репозитории, вместе с примерами использования и тестирующими библиотеку программами для микроконтроллеров [18]. Код также содержит комментарии, необходимые для генерации документации средствами Doxygen [20].

Работа библиотеки была успешно протестирована на микроконтроллерах серии ESP8266 и платформы Arduino. Средства библиотеки корректно решают все поставленные перед ней задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были составлены требования платформы SciVi к программному модулю управления энергонезависимой памятью микроконтроллеров. Были проанализированы существующие решения для управления такой памятью. По итогам анализа было установлено, что они не удовлетворяют поставленным требованиям, было принято решение о разработке собственного решения в виде библиотеки классов C++. Такая библиотека была спроектирована, реализована и протестирована на целевых платформах. Разработанная библиотека удовлетворяет поставленным требованиям, успешно прошла тестирование и готова к интеграции в платформу SciVi, что полностью соответствует поставленной в данной работе цели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ryabinin K., Chuprina S.* Adaptive Scientific Visualization System for Desktop Computers and Mobile Devices // *Procedia Computer Science*. — 2013. — Т. 18. — С. 722—731.
2. Ontology-Driven Visual Analytics Platform for Semantic Data Mining and Fuzzy Classification / R. Konstantin [и др.] // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. — 2022. — Т. 358. — С. 1—7.
3. *Ryabinin K., Chuprina S.* Ontology-Driven Edge Computing // *Computational Science – ICCS 2020*. — Springer, 2020. — С. 312—325.
4. *Konstantin R., Svetlana C., Ivan L.* Tackling IoT Interoperability Problems with Ontology-Driven Smart Approach. — 2021.
5. *Tarui Y., Hayashi Y., Nagai K.* Proposal of electrically reprogrammable non-volatile semiconductor memory // *Proceedings of the 3rd Conference on Solid State Devices*. — Tokyo : The Japan Society of Applied Physics, 1971. — С. 155—162.
6. *Tarui Y., Hayashi Y., Nagai K.* Electrically reprogrammable nonvolatile semiconductor memory // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. — 1972. — Т. 7, вып. 5. — С. 369—375.
7. Arduino core for ESP8266 WiFi chip / I. Grokhotkov [и др.]. — URL: <https://github.com/esp8266/Arduino>.
8. *Arduino Software*. EEPROM Library. — URL: <https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/eeprom>.
9. *Elenbaas T.* Arduino-EEPROMEx. — 2012. — URL: <https://github.com/thijse/Arduino-EEPROMEx>.
10. *Маѝоров А.* EEManager. — 2021. — URL: <https://github.com/GyverLibs/EEManager>.
11. *Massachusetts Institute of Technology*. MIT License. — 1988. — URL: <https://opensource.org/license/mit/>.

12. *Atmel Corporation*. AVR101: High Endurance EEPROM Storage. — 2002. — URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/doc2526.pdf>.
13. *Rosenberg P.* EEPROMWearLevel. — 2016. — URL: <https://github.com/PRosenb/EEPROMWearLevel>.
14. *The Apache Software Foundation*. Apache License, Version 2.0. — 2004. — URL: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>.
15. *Grokhotkov I.* ESP8266 EEPROM Library. — 2014. — URL: <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/libraries/EEPROM>.
16. *Hirnschall S.* ESP8266: Read and Write from/to EEPROM (Flash Memory). — 2021. — URL: <https://blog.hirnschall.net/esp8266-EEPROM/>.
17. A new flash E2PROM cell using triple polysilicon technology / F. Masuoka [и др.] // 1984 International Electron Devices Meeting. — San Francisco, CA, USA : IEEE, 1984. — С. 464—467.
18. *Lukianov A.* EEManager. — 2023. — URL: <https://github.com/almiluk/EEManager/>.
19. *Peterson W. W., Brown D. T.* Cyclic Codes for Error Detection // Proceedings of the IRE. — 1961. — Т. 49, вып. 1. — С. 228—235.
20. Doxygen / D. van Heesch [и др.]. — 1997. — URL: <https://www.doxygen.nl/>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример использования разработанной библиотеки

```
#include <EEManager.h>

struct my_datatype {
    uint8_t a = 1;
    char[10] = { 0 };
};

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Инициализация библиотеки
    EEMemManager::init();
    // Получение разделов
    MemPart part1 = EEMemManager::GetMemPart("part1");
    MemPart part2 = EEMemManager::GetMemPart("part2");

    // Получение переменной
    // Вывод порядкового номера запуска
    bool created;
    int loads_num = 1;
    EEPROMVar loads_num_var = part1.getVar("loads_num", &loads_num, &created);
    Serial.print("Load #");
    Serial.println(loads_num);
    if (created)
        Serial.println("First run. Counter was created in EEPROM.");
    else
        Serial.println("Not first run. Counter was found in EEPROM.");
}
```

```

// Обновление порядкового номера запуска
loads_num++;
loads_num_var.updateNow();

// Получение переменной сложного типа
my_datatype my_var;
EEPROMVar next_load_num_var = part1.getVar("testVar", &my_var);

// Получение переменной с таким же именем, но из другого раздела
int x = 4;
EEPROMVar x_var = part2.getVar("testVar", &x);
Serial.print("x ");
Serial.println(x);

x++;
x_var.update();

while (!x_var.tick()){
    Serial.println("Waiting...");
    delay(1);
}
Serial.println("Variable has been updated");

// Чтение нового значения в другую переменную (локальная переменная x, в любом случае)
int y;
EEPROMVar x_var = part2.getVar("testVar", &y);
Serial.print("New value: ");
Serial.println(y);
}

void loop() {

}

```