

УДК 004.258, 004.422.63

*Ле Ба Чунг<sup>1</sup>, Ю. А. Холопов<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup>Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН

## Технология построения регистратора параметров цифровой системы управления на основе сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти

В работе рассматривается подход к построению автономного регистратора параметров на базе сегнетоэлектрической памяти (FRAM) с унифицированной структурой данных. Предложенный регистратор обладает дополнительными функциональными и технологическими возможностями: автономностью, универсальностью архитектуры, возможностью сохранения аварийного кадра данных, гибкой настройкой селектора данных, возможностью удаленного изменения режимов работы.

**Ключевые слова:** узел регистрации параметров, автономный регистратор, структура данных, согласованная информационная среда, FRAM.

*Le Ba Chung<sup>1</sup>, Y. A. Holopov<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)<sup>2</sup>Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering

## Registrar parameters building technology of a digital control system on the basis of ferroelectric nonvolatile memory

The paper considers an approach to the construction of an autonomous parameter recorder based on FRAM with a unified data structure. The proposed registrar has an additional functional and technological capabilities: autonomy, versatility architecture, the ability to save several recent data frames, up to the accident, flexible setting of the data selector, the ability to remotely change operating modes.

**Key words:** node of registration parameters, autonomous registrar, data structure, consistent information environmen, FRAM.

### 1. Введение

Контроль функционирования цифровых систем управления (ЦСУ) является одной из постоянно актуальных технических задач. При ее решении необходимо учитывать не только усложнение объекта контроля — цифровых систем управления, но и новые требования к автономности и гибкости узла контроля — регистратора параметров (РП).

Для ответственных применений автономность функционирования является обязательной характеристикой узла регистрации параметров. РП не должен влиять на работу ЦСУ, ухудшать ее параметры качества и усложнять внутренние связи. Свойство автономности накладывает на реализацию регистратора параметров дополнительные требования. Целью работы является разработка типовых решений для реализации автономного РП в цифровых системах управления.

## 2. Анализ типовой структуры регистратора параметров

Один из существующих и распространенных способов реализации РП предлагает формирование всех необходимых для сохранения структур данных в центральном вычислителе и прямую передачу их в регистратор. Такая реализация изображена на рис. 1, где  $D_1 \dots D_n$  — датчики, а  $IY_1 \dots IY_m$  — исполнительные устройства.

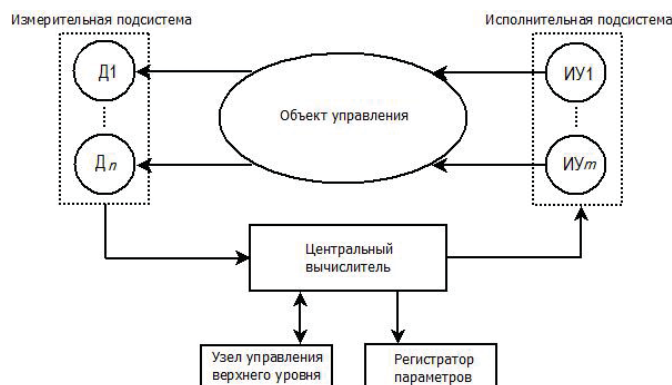


Рис. 1. Подключение регистратора параметров в системе управления

При такой организации фиксация параметров состояния ЦСУ производится кадрами. Кадр — структурированная единица информации. Он формируется центральным вычислителем. Полученный от центрального вычислителя кадр данных регистратор сохраняет в энергонезависимой памяти (ЭНП). В качестве энергонезависимой памяти до последнего времени использовалась память FLASH-типа, имеющая страничную организацию.

Кадровая структура данных хорошо сочетается со страничной структурой памяти FLASH-типа, но использование в регистраторе памяти со страничной организацией имеет следующие недостатки:

- в случае аварии система управления теряет последний кадр данных, сформированный в центральном вычислителе для записи в регистраторе;
- необходимость буферизации кадра перед записью в ЭНП;
- размер кадра должен быть согласован с размером страницы энергонезависимой памяти.

Использование в качестве ЭНП памяти FRAM-типа позволяет преодолеть выше описанные недостатки. Кадровая структура данных является удобным и привычным форматом, который целесообразно сохранить.

Другим недостатком известных регистраторов являлась невозможность гибкого формирования списка событий, регистрируемых в разных фазах функционирования системы управления. Список параметров, необходимых для сохранения, обычно определялся жестко при проектировании системы управления, что ограничивало функциональные возможности узла регистрации параметров при тестировании и отладке системы управления.

## 3. Характеристики энергонезависимой памяти FRAM-типа

От выше перечисленных недостатков памяти со страничной организацией FLASH-типа свободна энергонезависимая память нового типа: FRAM. Энергонезависимая память FRAM [1, 2] — это запоминающее устройство типа RAM, которое использует сегнетоэлектрический эффект, то есть возможность материала сохранять электрическую поляризацию в отсутствие внешнего электрического поля для реализации механизма хранения данных. Её отличиями от ЭНП других типов являются отсутствие страничной структуры и гарантировано большое количество циклов записи.

Рассмотрим характеристики FRAM, которые позволят реализовать новые функциональные возможности регистратора параметров:

- высокая скорость выполнения словных операций, сравнимая со скоростью SRAM;
- неограниченное (порядка  $10^{14}$ ) количество циклов записи;
- отсутствие подготовительных операций при записи;
- сохранение данных при пропадании питания без внешнего управления, т.е. без каких-либо дополнительных действий.

Единственной характеристикой, по которой FRAM уступает другим типам ЭНП, является объём, но сейчас он уже достаточен для решения задачи регистрации параметров напрямую без использования дополнительного буфера, т.е. без использования дополнительной энергонезависимой памяти.

Высокое быстродействие и практически неограниченное количество циклов записи в FRAM позволяют реализовать в ней ранее невозможный режим фоновой регистрации, который подробно описан ниже.

#### 4. Регистратор параметров цифровой системы управления, работающий в фоновом режиме

Основной функцией регистратора является сохранение параметров системы управления по заранее сформированному набору событий с возможностью считывания и анализа данных после восстановления питания. Современный регистратор параметров должен обладать следующими характеристиками: автономностью, универсальностью архитектуры и активностью во всех циклах управления объектом, включая последний — аварийный.

Рассматриваемый подход заключается в том, что регистратор параметров подключается к сечению информационного канала вычислителя, в котором циркулируют все параметры состояния и управления. Селекцию данных для последующего сохранения регистратор производит самостоятельно без участия системы управления. Селектор настраивается или из центрального вычислителя в штатном режиме работы, или удаленно в режимах тестирования и отладки системы. Возможность гибкой настройки селектора данных повышает универсальность узла регистрации параметров.

Обсудим некоторые особенности реализации регистратора параметров. Для сохранения информации о состоянии системы управления может использоваться не только FRAM, но и любая энергонезависимая память других типов. После формирования кадра параметров системы в момент его сохранения возможно аварийное пропадание напряжения питания, но необходимо обеспечить высокоскоростную запись кадра без потерь. Решение задачи высокоскоростной записи кадра информации состоит в выборе соответствующего типа ЭНП и алгоритма управления процессом автоматического сохранения параметров.

На основе проведенного анализа был разработан автономный регистратор параметров на базе FRAM для цифровых систем управления. На рис. 2 представлена схема подключения РП в системе управления.

Принцип работы данного автономного регистратора заключается в следующем:

- в системе управления, построенной рациональным образом, есть отдельный блок, отвечающий за управление периферийными устройствами. Регистратор подключается к системе управления через этот блок как одно из активных периферийных устройств [3]. Таким образом, сокращается количество дополнительных связей и блоков обработки входных данных, повышается степень эффективности и экономичности реализации данного решения, не усложняются структурные связи и процесс функционирования системы;

- регистратор имеет доступ к первичным параметрам состояния объекта управления. Это обеспечивает фиксацию параметров состояния в реальном масштабе времени;
- выбор информации для записи в РП управляется унифицированными параметрическими шкалами. Шкалы определяют не только селекцию данных, но и временные параметры фиксации. Параметрические шкалы загружаются из памяти вычислителя в начале работы системы или при изменении режима работы регистратора;
- параметры каждого цикла управления, выбранные селектором данных, последовательно сохраняются в регистраторе.

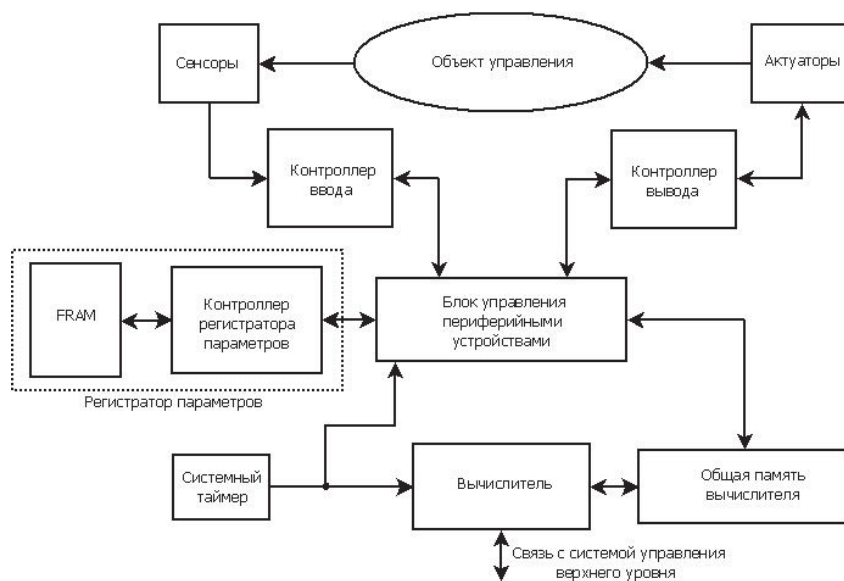


Рис. 2. Структурная схема подключения автономного регистратора в цифровой системе управления

Описанный выше механизм гибкой настройки селектора данных позволяет при неизменном объеме ЭНП регистратора фиксировать максимальное количество событий в цифровой системе управления.

Заметим, что для любых систем управления длительность цикла зависит от времени вычисления управляющих воздействий и длительности операций ввода-вывода. Предложенный способ подключения РП к ЦСУ через блок управления периферийными устройствами позволяет фиксировать параметры системы управления с максимально возможным темпом – темпом обновления информации о состоянии системы.

Сформированный селектором РП-кадр данных фиксируется в регистраторе параметров. Для ускорения процесса записи готового кадра используется механизм параллельного чтения и записи кадров данных FIFO [4].

При подобной реализации регистратора параметров возникает возможность использования его не только в процессе штатного функционирования системы управления, но и в процессе отладки, настройки и т.д. Аппаратная реализация регистратора на FRAM предполагает кроме основных режимов (отладочного режима, режима регулярной работы, режима разгрузки данных) выполнение технологических задач: инициализации памяти, проверки целостности данных, специализированной разметки памяти [5].

## 5. Диаграмма формирования событий фиксации параметров

События в цифровой системе управления носят упорядоченный, циклический характер [6]. Все узлы ЦСУ работают по фиксированному, заранее сформированному расписанию. Поэтому целесообразно в этой синхронной среде построить РП также по синхронному принципу.

В цифровой системе управления можно выделить две группы параметров:

- циклические, возникающие с определенной периодичностью, кратной циклу управления;
- асинхронные, возникающие в произвольный момент цикла управления при оценке значений параметров состояния системы.

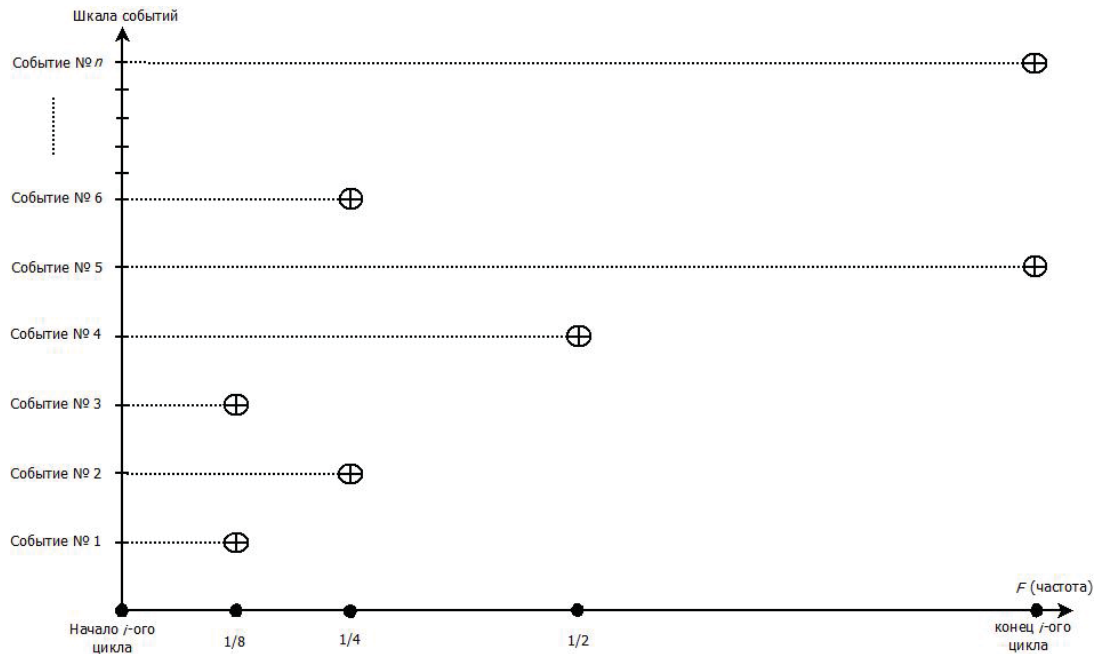


Рис. 3. Частотная диаграмма циклической селекции событий

На рис. 3 показана частотная диаграмма циклической селекции событий. На этой диаграмме для каждого события условно показана частота, с которой оно фиксируется. Частота фиксации события задается индивидуальной битовой шкалой.

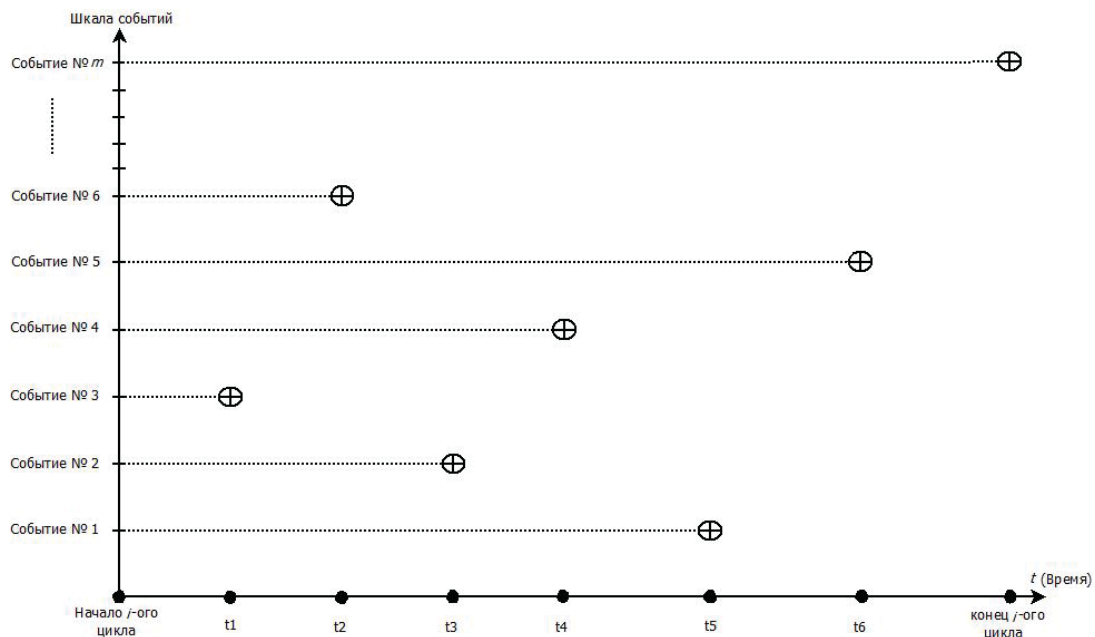


Рис. 4. Временная диаграмма селекции асинхронных событий

На рис. 4 показана временная диаграмма селекции асинхронных событий. Асинхронные события описываются с помощью двух параметров величин: нижнего и верхнего порога,

а также двух признаков: знаков сравнения с порогами. Когда событие попадает в список фиксируемых (срабатывает контроль диапазона), запоминается момент времени в привязке к номеру события. Значения порогов и знаков сравнения запоминаются как параметры настройки в общей памяти вычислителя и разгружаются один раз из общей памяти вычислителя в начале работы системы.

Оба механизма фиксации описываются малоразрядными битовыми шкалами. Эти шкалы можно обновлять через низкоскоростной технологический канал, в том числе при удаленном изменении режимов работы регистратора параметров.

Набор задач и событий фиксации параметров в разных фазах жизненного цикла ЦСУ определяет структуру данных регистратора, оптимальную для трех основных задач: анализа причин аварии, регулярной работы и отладки. Совокупность структур данных для каждой задачи формирует общую структуру данных регистратора. Набор событий фиксации параметров аналогично компоуется из списка событий, соответствующих каждой задаче жизненного цикла системы управления.

## 6. Выводы

В работе предложен подход к построению РП, который может быть реализован и без FRAM, но именно использование FRAM позволяет реализовать новое свойство регистратора – возможность сохранения нескольких последних кадров данных, вплоть до аварии.

Предложен регулярный механизм формирования событий фиксации с гибкой настройкой списка регистрируемых событий и возможностью удаленного изменения режимов работы регистратора.

Разработанная унифицированная структура данных для РП в цифровых системах управления сильно упрощает анализ аварийных событий. Предложенный способ подключения регистратора параметров к ЦСУ легко реализуется в цифровой системе управления с отдельными узлами управления периферией.

## Литература

1. *Rzehak V.* Особенности применения FRAM микроконтроллеров Texas Instruments // РадиоЛоцман. 2012. Т. 4.
2. *Угрюмов Е.П.* Запоминающие устройства. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 816 с.
3. *Холопов Ю.А., Ле Ба Чунг, Нгуен Тхань Чунг* Согласованная информационная среда для высокодинамичной системы управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 12, вып. 17. С. 816–820.
4. *Ле Ба Чунг, Нгуен Тхань Чунг* Особенности подключения периферийных устройств к микропроцессору в высокодинамичной системе управления // Труды XXI Международной научно-практической конференции Спутник+ «Техника и технология: новые перспективы развития». 2016. С. 15–18.
5. *Н.Б. Преображенский, Холопов Ю.А., Ле Ба Чунг* Регистратор параметров цифровой системы управления на основе FRAM // Труды Международной конференции МФТИ «En&T». 2016. С. 172–173.
6. *Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б.* Циклическое цифровое управление // Технические науки. 2014. Т. 7. С. 39–41.

## References

1. *Rzehak V.* Features of the application of FRAM microcontrollers Texas Instruments. Radiolocman. 2012. V. 4.
2. *Ugryumov E.P.* Storage devices. SPb: BHV-Petersburg, 2010. 816 p.

3. *Holopov Y.A., Le Ba Chung, Nguyen Thanh Trung* A consistent information environment for high dynamic control system. *Mechatronics, Automation, Control*. 2016. V. 12, I. 17. P. 816–820.
4. *Le Ba Chung, Nguyen Thanh Trung* Features of peripheral devices connection to a microprocessor in a highly dynamic control system. *Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference Satellite+ «Technics and technology: new development prospects»*. 2016. P. 15–18.
5. *Preobrazhensky N.B., Holopov Y.A., Le Ba Chung* Parameters registrar of a digital control system based on FRAM. *Proceedings of the International Conference MIPT «En&T»*. 2016. P. 172–173.
6. *Holopov Y.A., Preobrazhensky N.B.* Cyclic digital control. *Technical science*. 2014. V. 7. P. 39–41.

*Поступила в редакцию 22.05.2017*