

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-116-124

УДК 621.34

Применение EtherCAT в отечественных медицинских изделиях с компьютерной томографией

Лев Николаевич Рассудов¹✉, Дмитрий Александрович Осипов²,
Михаил Геннадьевич Тяпкин³

^{1,2,3} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация

¹ rassyd@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6431-9094>

² osipovdma09@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9597-0522>

³ tiapkinmg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7859-5580>

Аннотация

Введение. Компьютерная томография является мощным инструментом для диагностики, например, в онкологии, травматологии, стоматологии. Кроме того, компьютерная томография может применяться для проверки и коррекции позиционирования медицинского оборудования относительно тела пациента при проведении терапевтических процедур, например, брахитерапии или дистанционной лучевой терапии с визуальным контролем. В состав медицинских изделий с компьютерной томографией входит электроприводной механизм перемещения гантри — подвижной части аппарата, поддерживающей и перемещающей медицинское оборудование: рентгеновскую трубку и детектор рентгеновского излучения, радиационную головку и др. Улучшение возможностей синхронизации событий между компонентами медицинского оборудования и с системой движения открывает новые возможности построения архитектуры системы управления медицинских изделий. Применение промышленной шины жесткого реального времени Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) может повысить скорость и безопасность проведения медицинских процедур. **Метод.** Предложена программно-аппаратная платформа, включающая ведущее и ведомое устройства EtherCAT. Ведущее устройство построено на основе программного обеспечения с открытым исходным кодом, в первую очередь, Linux и IgH, установленного на персональном компьютере. Ведомые устройства реализованы на доступной элементной базе. Исследованы возможности синхронизации событий ведомых устройств, а также стабильность работы EtherCAT на частоте 1 кГц. **Основные результаты.** Экспериментальные результаты получены на специально разработанном стенде. Ведущее устройство EtherCAT установлено на типовом персональном компьютере, а EtherCAT стек двух ведомых устройств реализован на распространенных микроконтроллерах. Показана возможность синхронизации событий в ведомых устройствах на уровне 0,1 мкс. Стабильность работы EtherCAT на базе предложенной платформы подтверждается высокой стабильностью измеренного времени цикла 1000 мкс с фазовым дрожанием (джиттером) на уровне единиц микросекунд. В сравнении с наиболее распространенным решением для построения ведущих устройств на базе персональных компьютеров The Total Windows Control and Automation Technology (TwinCAT), предложенная программная платформа продемонстрировала идентичные возможности синхронизации, но в несколько раз лучшую стабильность времени цикла EtherCAT. **Обсуждение.** Возможность использования доступных программных продуктов и элементной базы для разработки ведущего и ведомых устройств с последующим развертыванием сети EtherCAT позволит улучшить характеристики отечественных медицинских изделий компьютерной томографии и обеспечит высокий уровень производственной безопасности.

Ключевые слова

компьютерная томография, электрический привод, мехатроника, промышленные сети, системы реального времени, EtherCAT, синхронизация, открытый исходный код, операционная система, Linux

Благодарности

Авторы благодарят «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации (НИИТФА) и Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ» за содействие в проведении исследования.

© Рассудов Л.Н., Осипов Д.А., Тяпкин М.Г., 2026

Ссылка для цитирования: Рассудов Л.Н., Осипов Д.А., Тяпкин М.Г. Применение EtherCAT в отечественных медицинских изделиях с компьютерной томографией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 116–124. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-116-124

Implementing EtherCAT for computed tomography featured medical devices

Lev N. Rassudov¹, Dmitriy A. Osipov², Mikhail G. Tiapkin³

^{1,2,3} National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation

¹ rassyd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6431-9094>

² osipovdma09@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9597-0522>

³ tiapkinmg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7859-5580>

Abstract

Computed tomography is used for diagnostic purposes in various fields: oncology, traumatology, dentistry, etc. Additionally, it is implemented to provide the information on the correct patient positioning relative to therapeutic equipment for example in brachytherapy or in image guided radiation therapy complexes. As a rule, such installations include an electric power drive system for gantry — moving part of the apparatus holding medical equipment: X-ray tube and detector, radiation head et al. Improving the event synchronization between the components of medical equipment and those to the motion control system opens up new abilities for control system architecture design. Implementing a single real time fieldbus such as EtherCAT for data exchange between the subsystems can enable high level of synchronization expediting the therapy procedure and improving safety. A platform for deploying EtherCAT in medical devices is proposed. It includes EtherCAT master and slave implementations. The PC-deployed EtherCAT master is based on open-source software: Linux, IgH EtherCAT master stack. The slave devices are implemented with market available components. The stability of the EtherCAT cycle time at 1 kHz and the slave devices events synchronization abilities are being investigated. The experimental results obtained from a designed setup with such an EtherCAT master controlling two slave devices developed showed the ability to synchronize events between the two slave devices within a sub 100 ns range. The stability of the proposed EtherCAT platform was proved with the measured 1000 us EtherCAT cycle time jitter of a few microseconds. It is possible to improve the performance of medical devices with computed tomography by implementing the EtherCAT industrial network. The proposed solution, based on open-source software and market-available components, provides a high level of production safety.

Keywords

computed tomography, electric drives, mechatronics, X-ray imaging, motion control, real time systems, networked control systems, synchronization, open-source software, EtherCAT, operating system, Linux

Acknowledgements

The authors thank “State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research” (JSC “SRC RF TRINITI”), “Research Institute of Technical Physics and Automation” (JSC “NIITFA”) and Research and Production Center “Lasers and Apparatus TM” for assistance in conducting the research.

For citation: Rassudov L.N., Osipov D.A., Tiapkin M.G. Implementing EtherCAT for computed tomography featured medical devices. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 116–124 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-116-124

Введение

Для получения трехмерных изображений внутренних тканей тела пациента в онкологии [1], травматологии, стоматологии [2] и других областях медицины часто используется компьютерная томография. Кроме того, компьютерная томография может применяться для проверки и коррекции позиционирования медицинского оборудования относительно тела пациента при проведении терапевтических процедур, например, брахитерапии или дистанционной лучевой терапии с визуальным контролем. В состав медицинских изделий с компьютерной томографией входит электроприводной механизм перемещения гантри¹ — подвижной части аппарата, поддерживающей и перемещающей медицинское оборудование: рентгеновскую трубку и детектор рентгеновского излучения, радиационную головку и др. Рентгеновская трубка и детектор рентгеновского

излучения располагаются на гантри и осуществляют рентгеновские снимки в ходе его вращения вокруг зафиксированного пациента [3]. Для позиционирования пациента относительно изоцентра гантри может быть предусмотрена и другая мехатронная система — стол пациента. В зависимости от конкретного применения могут отличаться требования к электроприводным системам, определяющие необходимый функционал, а также возможности синхронизации во времени механических перемещений как между собой, так и с работой других узлов. Улучшение синхронизации может быть использовано для построения новых архитектур программного обеспечения медицинских изделий, возможности ускорить проведение процедуры сканирования и повысить безопасность.

В настоящей работе рассматриваются системы управления медицинских изделий для конусно-лучевой компьютерной томографии, спиральной компьютерной томографии и лучевой терапии с визуальным контролем. Для функционирования рассматриваемых медицинских изделий может быть достаточно обеспечить обмен данными управления и телеметрии с частотой

¹ ГОСТ Р МЭК/ТО 60788-2009. Изделия медицинские электрические. Словарь. Введ. 09.12.2009. М.: Стандартинформ, 2011. 242 с.

порядка сотен герц. При этом отдельные узлы, в частности системы управления электроприводов, могут работать и на более высокой частоте, но асинхронно с другими подсистемами. В связи с этим точная синхронизация событий в подсистемах и многоуровневый функционал безопасности обеспечивается перекрестными связями всех компонентов медицинского изделия между собой через дополнительные интерфейсы — в обход основного управляющего устройства. Это существенно усложняет топологию системы, не в полной мере обеспечивает ее модульность, унификацию и надежность, а также усложняет разработку и обслуживание.

Проведено исследование возможности построения систем управления медицинских изделий с использованием единого интерфейса обмена данными реального времени Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT), который должен позволить поднять частоту синхронизированного обмена данными до 1 кГц и сделать его детерминированным для более высокой интеграции подсистем. Кроме того, необходимо обеспечить возможность задания времени событий в ведомых устройствах с точностью на уровне 1 мкс: сигналы управления (рентгеновской трубкой, детектором и др.); измерение физических величин (например, позиции). Возможность достижения таких показателей за счет использования единого интерфейса реального времени позволяет изменить архитектуру системы управления отечественных медицинских изделий и достичь более высоких показателей синхронизации. Исходя из этого, использование EtherCAT может не только повысить скорость и безопасность проведения медицинских процедур, но и упрощает разработку, производство и обслуживание рассматриваемых медицинских изделий.

Преимущества использования сети реального времени (EtherCAT — наиболее распространенная) можно эффективно использовать в том случае, если все процессные данные передаются по этой сети. Для этого все подсистемы, например, комплекса дистанционной лучевой терапии, должны поддерживать EtherCAT. В настоящий момент на отечественном рынке широко представлены только системы управления электропривода (сервоусилители), поддерживающие этот интерфейс. При этом не представлены в достаточной мере ведущие устройства, а также ведомые системы локального управления линейного ускорителя частиц, коллиматора, рентгеновского оборудования и другие с поддержкой EtherCAT. Решению этой проблемы посвящена текущая работа.

Выполнен краткий обзор систем управления для конусно-лучевого компьютерного томографа (КЛКТ), многослойного спирального томографа (МСКТ) и комплексов дистанционной лучевой терапии с визуальным контролем в контексте требований синхронизации электроприводных механизмов с другими подсистемами. Приведено описание разработанной платформы с ведущим устройством EtherCAT. Представлен экспериментальный стенд, позволяющий оценить стабильность работы шины EtherCAT на частоте 1 кГц, а также возможности синхронизации событий в разработанных в рамках работы специализированных устройствах

являющихся, фактически, заготовками ведомых систем локального управления. В основу стенда заложены чипы, которые (или аналоги которых) доступны на отечественном рынке. Используются программные продукты исключительно с открытым исходным кодом [4]. Экспериментальные результаты показали высокую стабильность работы EtherCAT на частоте 1 кГц, а также возможность синхронизации ведомых устройств на уровне 0,1 мкс.

Требования к системам управления медицинских изделий

Конусно-лучевые компьютерные томографы.

Требования к КЛКТ рассмотрены на примере мобильного КЛКТ — разработки компании Росатом¹. Комплекс состоит из томографа и рентгенопрозрачного стола пациента (рис. 1, а). Он предназначен для использования в брахитерапии, травматологии, при повреждениях тканей головного мозга. В брахитерапии² [5] проверка расположения аппликаторов затруднена. Дело в том, что многослойным компьютерным томографом (МСКТ) не всегда можно воспользоваться. Кроме стоимости и ограниченной апертуры — перекалывание пациента на стол МСКТ и обратно может привести к смещению аппликаторов. Для решения этой проблемы было принято решение о создании мобильного КЛКТ со значительной апертурой и широким полем сканирования, который можно было бы перемещать в операционной. Для получения трехмерного изображения с помощью КЛКТ его гантри вращается вокруг пациента с постоянной скоростью (до 2,2 об/мин). При вращении рентгеновская трубка регулирует формирует пучки рентгеновского излучения конусной формы, которые после прохождения сквозь тело пациента улавливаются рентген-детектором. На основании полученных снимков (проекций на плоскостной рентген-детектор) и данных об углах, под которыми они были сделаны, возможна программная трехмерная реконструкция изображения. Размер вокселя таких аппаратов составляет 0,5 мм и более. Позиционирование пациента осуществляется заблаговременно по лазерным указателям вручную, в том числе за счет регулировки высоты и перемещения (на колесах) стола пациента. Пример применения аналогичного изделия в брахитерапии представлен в [6]. Оно имеет большую апертуру, является самоходным и позволяет осуществлять наклон оси вращения гантри, но не позволяет смещать рентгеновскую трубку и детектор для увеличения области сканирования при сохранении компактности.

В ходе проведения диагностической процедуры не предполагается изменение расположения рентгеновско-

¹ Медиациентр атомной промышленности. Разработки «Росатома» стали победителями национальной премии «Лучший промышленный дизайн России» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://atommedia.online/press-releases/razrabotki-rosatoma-stali-pobedit/> (дата обращения: 01.08.2025).

² Комплекс «Брахииум» для высокодозной брахитерапии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://niitfa.ru/client/meditsinskoe-apparatostroenie/gamma-terapevticheskiy-kompleks-brahium/> (дата обращения: 01.08.2025).

го оборудования на гантри, изменение наклона гантри или перемещение самого томографа, так как производится перед процедурой. В связи с этим для КЛКТ определяющими процессами, подлежащими синхронизации, являются работа рентгеновского оборудования и вращение гантри. При этом необходимо обеспечить:

- 1) качество рентгеновских снимков;
- 2) точность соотношения снимков с соответствующим углом поворота гантри [6].

Если первое требование обеспечивается корректной настройкой рентгеновского оборудования и ограничением на максимальную скорость вращения (смазывание изображения; требуемое количество кадров на оборот), то второе относится к системе движения непосредственно [7]. В случае, если система движения и система регистрации изображений не взаимодействуют друг с другом в реальном времени, для удобного соотношения получаемой от них информации важна стабильность двух показателей: скорости вращения и периода реги-

страции рентгеновских изображений. Использование EtherCAT позволит синхронизировать между собой обе информационные подсистемы и сможет обеспечить получение данных в том числе и на этапах разгона и торможения гантри, уменьшая требования к диапазону перемещений, а также к стабильности указанных показателей двух подсистем.

Спиральные компьютерные томографы. В отличие от КЛКТ спиральный томограф должен обеспечивать синхронизированное движение гантри и стола пациента [8–10]. В результате во время процедуры рентгеновское оборудование движется относительно пациента по спирали (рис. 1, *b*). Увеличение количества срезов в МСКТ позволяет увеличить сканируемую за один оборот гантри область (ускорить процедуру) или повысить разрешение получаемого изображения (уменьшение толщины среза). В МСКТ диапазон вращения не ограничен, что не позволяет использовать кабель-каналы для подключения оборудования, распо-

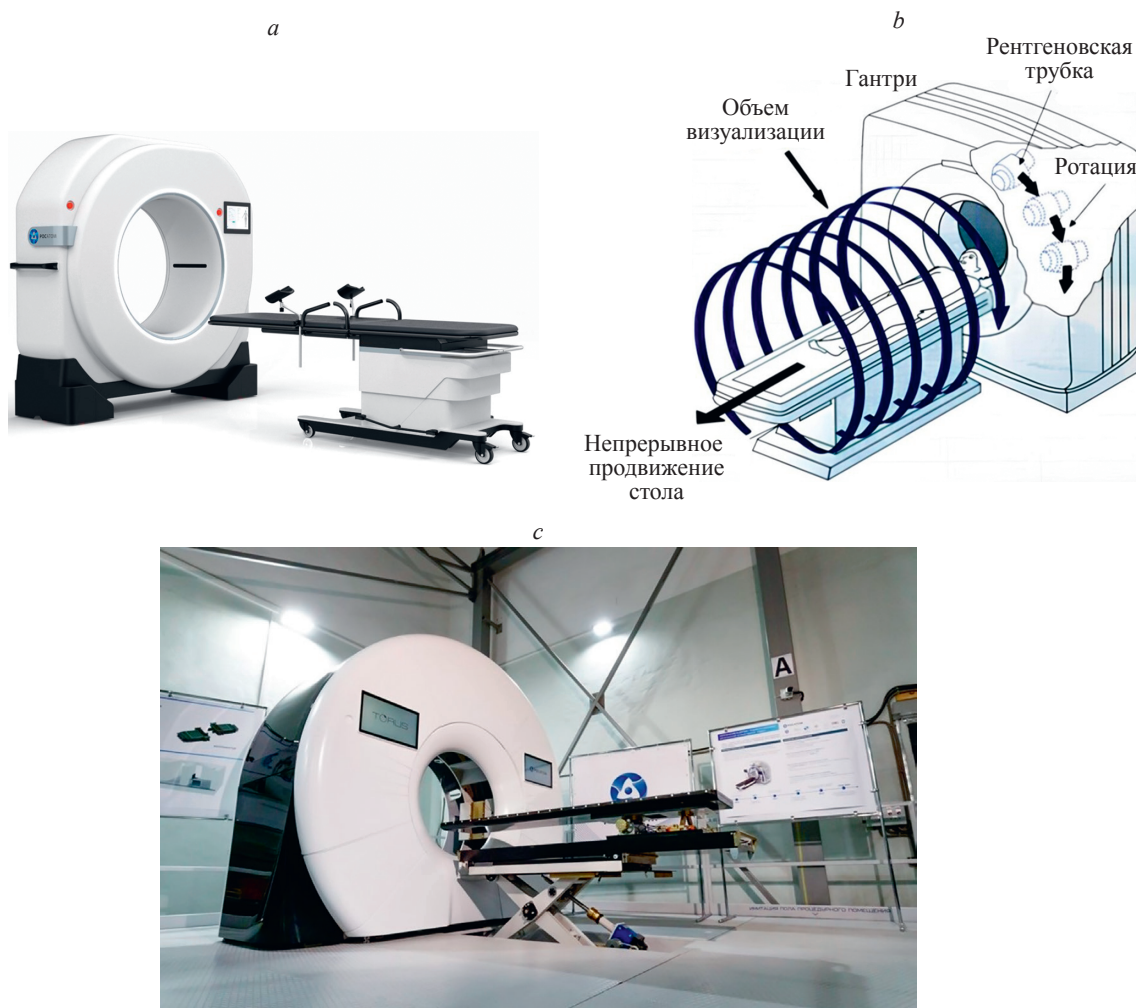


Рис. 1. Примеры рассматриваемых медицинских изделий: мобильный конусно-лучевой компьютерный томограф [6] (*a*); спиральный компьютерный томограф [10] (*b*); комплекс дистанционной лучевой терапии «Торус»¹ (*c*)

Fig. 1. Examples of medical devices considered: mobile cone beam computer tomography [6] (*a*); spiral computer tomography [10] (*b*); remote radiation therapy complex «Torus»¹ (*c*)

¹ Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». Ядерная медицина признана наиболее быстро развивающейся отраслью здравоохранения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/19/141661> (дата обращения: 01.08.2025).

ложенного на гантри. Для этого применяются в основном технические решения с токосъемными кольцами. Разгон гантри МСКТ осуществляется заблаговременно, а сама процедура проводится на установившейся частоте вращения гантри. Для обеспечения скорости процедуры частота вращения гантри здесь на два порядка выше: 2–3 оборота в секунду. За счет фильтрации возмущений подвижной массой гантри высокая частота вращения обеспечивает свою стабильность. С точки зрения перемещения пациента, часто достаточно обеспечить относительно грубое его позиционирование на столе, а перемещение стола пациента в ходе сканирования должно производиться на стабильной постоянной скорости. Стол является неотъемлемой частью комплекса. Он имеет одну или две степени свободы: привод подачи пациента и, часто, изменение высоты. МСКТ иногда оснащаются механизмом наклона оси вращения гантри. Подобно КЛКТ, в МСКТ можно добиться более точного соотношения во времени проекций на рентгеновский детектор с позиции стола пациента и углом поворота гантри при использовании EtherCAT. Но из-за высокой стабильности процессов, существенного повышения технических характеристик МСКТ для медицинских применений за счет именно улучшения синхронизации при текущем состоянии техники достичь практически невозможно.

Комплексы дистанционной лучевой терапии. Дистанционная лучевая терапия — неинвазивный метод лечения опухолей с помощью ионизированного излучения [11]. Суть терапии заключается в получении клетками опухоли дозы радиации, необходимой для разрушения ДНК — в соответствии с планом лечения. План лечения указывает, с какого направления и какая форма пучка излучения должна быть сформирована, какую дозу излучения должен получить пациент — с тем, чтобы осуществить лечение с минимальным воздействием на здоровые ткани [12]. В комплексе лучевой терапии критически важно осуществить точное совмещение тела пациента с рассчитанным заранее планом лечения. Для этого может использоваться встроенный КЛКТ, как это сделано в комплексах дистанционной лучевой терапии Росатома «Торус»¹ (рис. 1, с) и «Оникс»², а также Varian TrueBeam³ и др. Для достижения высокой повторяемости позиционирования пациента укладывают в индивидуальный «коконт» и позиционируют по меткам на теле. Далее делают компьютерную томографию и в соответствии с ней корректируют расположение пациента при помощи стола пациента с пятью механическими степенями свободы. 6-ая степень свобо-

ды (крен) компенсируется за счет смещения начального угла поворота гантри в плане на лечение. В некоторых комплексах для упрощения системы стол выполняется с меньшим числом степеней свободы⁴. В комплексе лучевой терапии томография — второстепенная функция. На гантри располагаются основные элементы лучевой терапии: линейный ускоритель электронов, коллиматор (в «Торусе» 140 электроприводных лепестков) и др. И если требования к системе движения для осуществления томографии соответствуют требованиям КЛКТ, то требования, предъявляемые к медицинским изделиям для лучевой терапии, подразумевают синхронную работу полутора сотен электроприводов совместно с электронной пушкой и многоуровневой системой защит. В [13] показано, что использование сети реального времени EtherCAT в сочетании с лицензионным программным обеспечением зарубежной разработки The Total Windows Control and Automation Technology (TwinCAT) позволило сделать более прозрачной топологию системы, повысить возможности синхронизации с обеспечением требуемого уровня безопасности пациента.

Ведущее устройство EtherCAT

Для рассмотренных типов отечественных медицинских изделий использование EtherCAT перспективно. Разворачивание ведущего устройства EtherCAT на базе персонального компьютера может быть целесообразным в связи с тем, что на нем может быть запущен и интерфейс управления медицинским изделием, и программные продукты реконструкции трехмерных изображений. Типовой платформой для построения системы управления в такой ситуации является зарубежный продукт TwinCAT. При этом требования по производственной безопасности отечественных производителей подразумевают полный отказ от закрытых программно-аппаратных решений зарубежных производителей с полным переходом на программные продукты с открытым исходным кодом. Соответствующая этому требованию платформа для построения ведущего устройства EtherCAT предложена в работе [4]. В ней для развертывания ведущего устройства EtherCAT использован персональный компьютер с операционной системой Ubuntu семейства Linux, модуля ядра IgH [14], патча RT_PREEMPT, веб-сервера и веб-клиента — все компоненты с открытым исходным кодом [15].

Экспериментальный стенд

Выполнено исследование возможностей разработанной программно-аппаратной платформы, основанной на доступных программных продуктах и элементной базе для разработки ведущего и ведомых устройств. Изучена стабильность цикла промышленной шины EtherCAT при типовой частоте 1 кГц, а также возможность синхронизации ведомых устройств друг с другом лучше

¹ Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». Ядерная медицина признана наиболее быстро развивающейся отраслью здравоохранения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/19/141661> (дата обращения: 01.08.2025).

² АО «Росатом». Сделано в Росатоме. Лучевая терапия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rutube.ru/video/e28fe2084e9c53b963ba2bd22806c89f/> (дата обращения: 01.08.2025).

³ Varian TrueBeam [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-delivery/truebeam> (дата обращения: 01.08.2025).

⁴ Varian Halcyon [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-delivery/halcyon> (дата обращения: 01.08.2025).

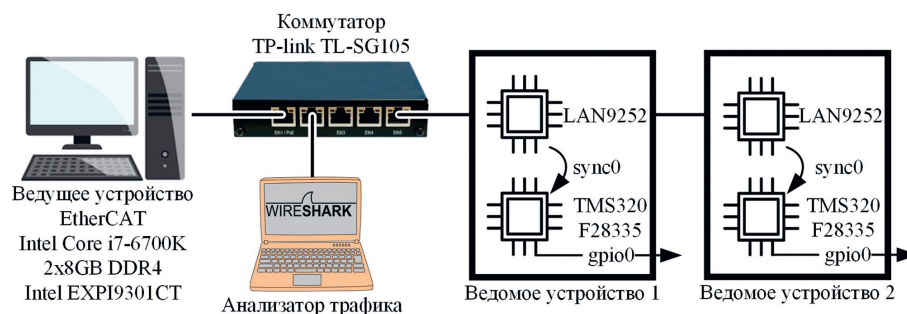


Рис. 2. Топология сети EtherCAT экспериментального стенда

Fig. 2. Experimental setup of EtherCAT topology

1 мкс. Для этого был разработан экспериментальный стенд. Топология сети EtherCAT показана на рис. 2. Ведущее устройство построено на базе персонального компьютера (Intel Core i7-6700K, 2x8GB DDR4, сетевая карта Intel EXPI9301CT¹) под управлением: Windows 10 и TwinCAT 3.1; предлагаемого решения на базе Ubuntu 22.04 с патчем Preempt и модулем IgH.

В сеть EtherCAT последовательно подключены два разработанных ведомых устройства. Ведомые устройства имитируют работу сервопривода по стандарту CiA DS-402². Они поддерживают режим Distributed Clock (DC), и позволяют синхронизировать опорный сигнал симметричной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по часам ведомого устройства 1. При этом обеспечиваются автомат состояний EtherCAT и обмен объектами процессных данных (Process Data Object, PDO) — слова управления, статуса, цифровые входы и выходы, задание на перемещения в различных режимах работы, обратная связь и др. Объем данных PDO, получаемых циклически каждым из ведомых устройств в ходе эксперимента, составляет 17 Б. В обратном направлении передается 21 Б. Оба ведомых устройства имеют абсолютно идентичный программный код и построены на EtherCAT Slave Chip (ESC) чип LAN9252 и распространенном процессоре TMS320 F28335PGFA.

Для определения возможностей синхронизации событий в ведомых устройствах осуществлен анализ синхронности переключения их дискретных выходов gpio0. В ходе эксперимента в каждом ведомом устройстве выполнялись исследования с помощью осциллографа двух сигналов: sync0 — сигнал синхронизации от ESC к процессору; gpio0 — сигнал, показывающий направление отсчета опорного сигнала симметричной ШИМ. На осциллографе был выставлен режим накопления результатов измерений (Persist: Infinite).

На рис. 3 показана часть экспериментального стенда. При отсутствии синхронизации моменты переключения gpio0 дрейфуют друг относительно друга из-за расхождений в частоте кварцевых генераторов.

¹ Beckhoff Information System. Supported network controllers [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/19/141661> (дата обращения: 01.08.2025).

² CAN in Automation. CiA 402 series: CANopen device profile for drives and motion control. Спецификация стандарта, версия 5.0.0 от 05.12.2023.

Механизм синхронизации DC состоит в том, что всем устройствам в сети в посылках передается информация о моменте времени, когда опорное устройство начало получать эту посылку. При известных задержках в передаче данных между всеми устройствами (измеряются при запуске сети) каждое устройство при получении посылки подстраивает свое время под опорное.

В качестве опорного устройства часто используется ведомое устройство 1, как сделано и в экспериментальном стенде. Время, соответствующее моменту начала получения посылки ведомым устройством 1, записывается в соответствующую посылку при передаче ее в следующий узел сети. Время цикла EtherCAT — разница значений времени, содержащихся в двух последовательных посылках. Фактически, оно показывает, насколько стабилен период, с которым ведущее устройство инициирует обмен данными реального времени.

Для обеспечения однотипного способа фиксации времени цикла EtherCAT для двух реализаций ведущего устройства в сеть был подключен коммутатор, дублирующий пакеты EtherCAT на независимый персональный компьютер с анализатором трафика WireShark. Коммутатор негативно влияет на сеть, внося дополнительную задержку, которая может быть нестабильной. Его использование в реальном изделии нежелательно, но в экспериментах он позволяет напрямую посмотреть, какие данные передаются по сети — без привязки к анализу трафика на базе устройств, работающих

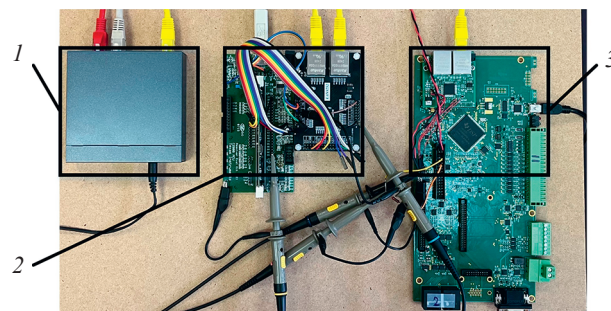


Рис. 3. Экспериментальный стенд.

Измерение сигналов синхронизации: 1 — коммутатор; 2 — ведомое устройство 1; 3 — ведомое устройство 2

Fig. 3. Experimental setup.

Synchronization signals measurement: 1 — switch; 2 — 1st EtherCAT slave; 3 — 2nd EtherCAT slave

в сети. По результатам дополнительных исследований, использование выбранного коммутатора не оказывает значимого влияния на результат экспериментов.

Экспериментальное исследование программно-аппаратной платформы

В ходе эксперимента исследовалась возможность реализации синхронного управления на разработанных для этого эксперимента ведомых устройствах с поддержкой стека протокола CiA DS-402 [16]. Имитация передачи результатов рентгенографических исследований в ходе эксперимента не осуществлялась.

Результаты измерения времени цикла (рис. 4) и полученная статистика (таблица) показывают, что предлагаемая программно-аппаратная платформа обеспечивает стабильную частоту EtherCAT 1 кГц, полностью удовлетворяющую потребности рассматриваемых в работе медицинских изделий.

Использование предложенного решения с IgH позволяет в разы улучшить стабильность цикла EtherCAT в сравнении с наиболее распространенным программным продуктом TwinCAT — за счет возможности более тонкой настройки операционной системы семейства Linux. В то же время максимальный разброс для обеих систем получился одного порядка, что связано с работой аппаратного System Agent используемого процессора (аналог функционала «северного моста»), определяющего доступ к памяти. Полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения частоты шины EtherCAT до 4 кГц и более — по меньшей мере, при отсутствии существенной посторонней вычислительной нагрузки. В первую очередь речь идет о нагрузке на графическую подсистему [16].

В экспериментах по синхронизации ведомых устройств (рис. 5) оба исследуемых варианта систем показали себя одинаково. Задержка сигналов синхронизации ведомого устройства 2 (опытного образца) относительно ведомого устройства 1 (макетного образца) обусловлена наличием в канале sync0 дополнительного мультиплексора, необходимого в сервоусилителе для реализации функционала, не связанного с EtherCAT. Даже с учетом этого, сигналы синхронизации sync0

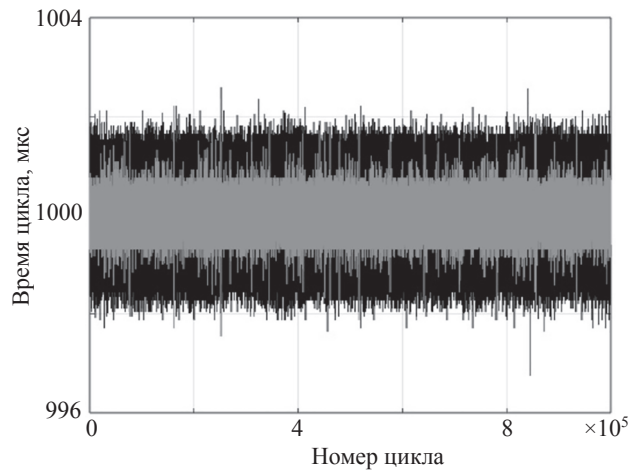


Рис. 4. Измеренное время цикла шины EtherCAT.

TwinCAT (черный цвет); IgH (серый цвет)

Fig. 4. Measured EtherCAT cycle time: black — TwinCAT; grey — IgH

Таблица. Статистика времени цикла шины EtherCAT, мкс

Table. EtherCAT cycle time statistics, μ s

Время цикла	TwinCAT	IgH
Среднее	1000,00	1000,00
Максимальное	1002,60	1002,40
Минимальное	996,80	997,60
Стандартное отклонение	0,930	0,20

передаются в микроконтроллер ведомого устройства с разницей во времени не более 25 нс. Фазовое дрожание сигналов sync0 относительно друг друга определяется работой устройств сети EtherCAT, а также чипов ESC, формирующих этот сигнал в каждом из ведомых устройств. Опорные сигналы ШИМ, формируемые микроконтроллером, расходятся не более, чем на 75 нс. Осциллограммы, полученные для ведомого устройства 1, показывают отклонения временной задержки выдачи выходного сигнала микроконтроллера относительно сигнала sync0 в пределах 20 нс, что

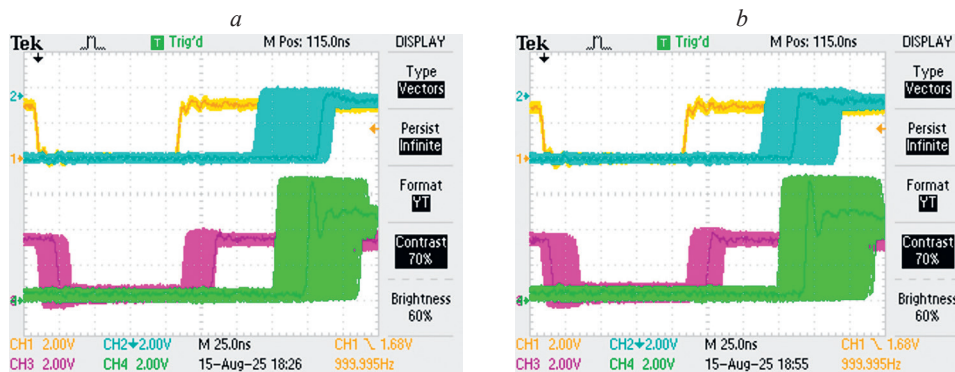


Рис. 5. Сигналы sync0 (CH1, CH3) и синхронизации несущих сигналов широтно-импульсной модуляции (CH2, CH4) для ведомых устройств 1 и 2: TwinCAT (a); предлагаемое решение (b)

Fig. 5. ESC signals sync0 (CH1, CH3) and pulse width modulation synchronization signals (CH2, CH4) of the 1st and 2nd EtherCAT slaves correspondingly: TwinCAT (a); proposed solution (b)

определяется особенностями архитектуры конкретного процессора и программной реализацией алгоритма фазовой автоподстройки частоты.

Обсуждение

Для рассмотрения возможности использования EtherCAT в качестве единственного интерфейса для обеспечения всего информационного обмена в медицинском изделии нужно кроме процессных данных управления учесть еще необходимость передачи исходных данных компьютерной томографии, а также требования резервирования функций безопасности.

В случае необходимости кроме процессных данных по EtherCAT можно передавать и данные компьютерной томографии (протоколы Ethernet over EtherCAT, File over EtherCAT). Однако это решение не выглядит целесообразным в связи с недостаточно высокой пропускной способностью канала: до нескольких минут увеличится минимальное время между процедурами, что критично. По этой причине для высокопроизводительного недетерминированного обмена данными компьютерной томографии в большинстве случаев удобнее использовать дополнительную шину (например, на базе Ethernet 1000BASE-T), связывающую напрямую подсистему рентген детектора с персональным компьютером, на котором производится томография.

Для обеспечения дополнительной безопасности в медицинских изделиях могут использоваться резервные аварийные линии связи между узлами, например, токовые петли. Это может быть необходимо, например, для аварийной блокировки линейного ускорителя электронов в случае, если какая-то из других подсистем перестала работать. В том числе для блокировки оборудования, если выявлена опасность здоровью и жизни

пациента в результате перемещения механизмов в пространстве и др. В перспективе для этих задач можно рассмотреть альтернативу с современными технологиями безопасности на уровне SIL 3¹, обеспечиваемыми EtherCAT за счет поддержки протокола Safety over EtherCAT (FSoE)².

Заключение

Использование для задач управления единого интерфейса реального времени EtherCAT позволит не только оптимизировать архитектуру системы управления медицинских изделий с компьютерной томографией, повысить их технологичность, но и положительно повлияет на их важнейшие технические характеристики: скорость проведения процедуры, и безопасность. Гарантия того, что необходимые данные доставляются в жестко детерминированные моменты времени, открывают новые возможности к построению всей информационной системы. Экспериментальные результаты исследования разработанной на базе доступных программно-аппаратных средств платформы, включающей ведущее и два ведомых устройства EtherCAT, показали ее стабильную работу, а также возможность синхронизации событий ведомых устройств существенно лучше 1 мкс. В связи с этим для повышения характеристик медицинских изделий с компьютерной томографией отечественные предприятия могут внедрять EtherCAT, при этом полагаясь исключительно на доступные технологии и обеспечивая высокий уровень производственной безопасности.

¹ Safety integrity level

² EtherCAT technology group. Safety over EtherCAT (FSoE) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ethercat.org/en/safety.html> (дата обращения: 06.12.2025).

Литература

1. Luke A.M., Shetty K.P., Satish S.V., Kilaru K. Comparison of spiral computed tomography and cone-beam computed tomography // *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*. 2013. V. 25. N 3. P. 173–177.
2. Venkatesh E., Elluru S.V. Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry // *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*. 2017. V. 51. N 3. P. S102–S121. <https://doi.org/10.17096/jiufd.00289>
3. Karius A., Karolczak M., Strnad V., Bert C. Technical evaluation of the cone-beam computed tomography imaging performance of a novel, mobile, gantry-based X-ray system for brachytherapy // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2022. V. 23. N 2. P. e13501. <https://doi.org/10.1002/acm2.13501>
4. Осипов Д.А., Рассудов Л.Н. Платформа для построения систем управления прецизионными электроприводами по промышленной шине EtherCAT // *Вестник Московского энергетического института*. 2025. № 4. С. 31–36. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2025-4-31-36>
5. Reniers B., Verhaegen F. Technical Note: Cone beam CT imaging for 3D image guided brachytherapy for gynecological HDR brachytherapy // *Medical Physics*. 2011. V. 38. N 5. P. 2762–2767. <https://doi.org/10.1118/1.3578929>
6. Karius A., Strnad V., Lotter M., Kreppner S., Bert C. First clinical experience with a novel, mobile cone-beam CT system for treatment quality assurance in brachytherapy // *Strahlentherapie und Onkologie*. 2022. V. 198. N 6. P. 573–581. <https://doi.org/10.1007/s00066-022-01912-7>

References

1. Luke A.M., Shetty K.P., Satish S.V., Kilaru K. Comparison of spiral computed tomography and cone-beam computed tomography. *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*, 2013, vol. 25, no. 3, pp. 173–177.
2. Venkatesh E., Elluru S.V. Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. S102–S121. <https://doi.org/10.17096/jiufd.00289>
3. Karius A., Karolczak M., Strnad V., Bert C. Technical evaluation of the cone-beam computed tomography imaging performance of a novel, mobile, gantry-based X-ray system for brachytherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. e13501. <https://doi.org/10.1002/acm2.13501>
4. Osipov D.A., Rassudov L.N. A platform for constructing precision electric drive control systems based on the ethercat industrial fieldbus. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, 2025, no. 4, pp. 31–36. (in Russian). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2025-4-31-36>
5. Reniers B., Verhaegen F. Technical Note: Cone beam CT imaging for 3D image guided brachytherapy for gynecological HDR brachytherapy. *Medical Physics*, 2011, vol. 38, no. 5, pp. 2762–2767. <https://doi.org/10.1118/1.3578929>
6. Karius A., Strnad V., Lotter M., Kreppner S., Bert C. First clinical experience with a novel, mobile cone-beam CT system for treatment quality assurance in brachytherapy. *Strahlentherapie und Onkologie*, 2022, vol. 198, no. 6, pp. 573–581. <https://doi.org/10.1007/s00066-022-01912-7>

7. Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective // *Radiation Oncology Journal*. 2018. V. 36. N 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.3857/roj.2018.00122>
8. Kalender W.A. Principles and Applications of Spiral CT // *Nuclear Medicine and Biology*. 1994. V. 21. N 5. P. 693–699. [https://doi.org/10.1016/0969-8051\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0969-8051(94)90039-6)
9. Kachelriess M. Principles, design, and operation of multi-slice CT // *Clinical Pet CT in Radiology Integrated Imaging in Oncology*. 2011. P. 1–19. https://doi.org/10.1007/978-0-387-48902-5_1
10. Леденев В. Аппараты КТ (компьютерные томографы) — виды и особенности. [Электрон. ресурс] <https://mrt-vmsk.ru/blog-opisanie-apparaty-kt-kompyuternye-tomografy/> (дата обращения 01.08.2025)
11. Sorcini B., Tilikidis A. Clinical application of image-guided radiotherapy, IGRT (on the Varian OBI platform) // *Cancer/ Radiothérapie*. 2006. V. 10. N 5. P. 252–257. <https://doi.org/10.1016/j.canrad.2006.05.012>
12. Franzone P., Fiorentino A., Barra S., Cante D., Masini L., Cazzulo E., et al. Image-guided radiation therapy (IGRT): practical recommendations of Italian Association of Radiation Oncology (AIRO) // *La Radiologia Medica*. 2016. V. 121. N 12. P. 958–965. <https://doi.org/10.1007/s11547-016-0674-x>
13. BECKHOFF Automation and IntraOp medical of U.S.A. Innovative radiation therapy uses flexible PC-based control platform // *PC Control Magazine*. 2013. N 2.
14. Delgado R., Hong C.H., Shin W.C., Choi B. Implementation and performance analysis of an etherCAT master on the latest real-time embedded linux // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. V. 10. N 24. P. 44603–44609.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619816 Российская Федерация. Программа «Программный комплекс для построения систем управления электроприводами по промышленной шине EtherCAT»: № 2025617474 заявлено 04.04.2025. опубликовано 18.04.2025. Бюл. № 4 / Осипов Д.А., Рассудов Л.Н. заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».
16. Cereia M., Bertolotti I.C., Scanzio S. Performance of a real-time EtherCAT master under Linux // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011. V. 7. N 4. P. 679–687. <https://doi.org/10.1109/tii.2011.2166777>
7. Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective. *Radiation Oncology Journal*, 2018, vol. 36, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.3857/roj.2018.00122>
8. Kalender W.A. Principles and Applications of Spiral CT. *Nuclear Medicine and Biology*, 1994, vol. 21, no. 5, pp. 693–699. [https://doi.org/10.1016/0969-8051\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0969-8051(94)90039-6)
9. Kachelriess M. Principles, design, and operation of multi-slice CT. *Clinical Pet CT in Radiology Integrated Imaging in Oncology*, 2011, pp. 1–19. https://doi.org/10.1007/978-0-387-48902-5_1
10. Ledenev V. *Computed Tomographs (CT) Scanners — Types and Features*. Available at: <https://mrt-vmsk.ru/blog-opisanie-apparaty-kt-kompyuternye-tomografy/> (accessed: 01.08.2025). (in Russian)
11. Sorcini B., Tilikidis A. Clinical application of image-guided radiotherapy, IGRT (on the Varian OBI platform). *Cancer/ Radiothérapie*, 2006, vol. 10, no. 5, pp. 252–257. <https://doi.org/10.1016/j.canrad.2006.05.012>
12. Franzone P., Fiorentino A., Barra S., Cante D., Masini L., Cazzulo E., et al. Image-guided radiation therapy (IGRT): practical recommendations of Italian Association of Radiation Oncology (AIRO). *La Radiologia Medica*, 2016, vol. 121, no. 12, pp. 958–965. <https://doi.org/10.1007/s11547-016-0674-x>
13. BECKHOFF Automation and IntraOp medical of U.S.A. Innovative radiation therapy uses flexible PC-based control platform. *PC Control Magazine*, 2013, no. 2.
14. Delgado R., Hong C.H., Shin W.C., Choi B. Implementation and performance analysis of an etherCAT master on the latest real-time embedded linux. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44603–44609.
15. Osipov D.A., Rassudov L.N. *Software package for building electric drive control systems via the EtherCAT industrial bus*. Certificate of the State computer program registration RU 2025619816. 2025. (in Russian)
16. Cereia M., Bertolotti I.C., Scanzio S. Performance of a real-time EtherCAT master under Linux. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 679–687. <https://doi.org/10.1109/tii.2011.2166777>

Авторы

Рассудов Лев Николаевич — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 57188955455](https://orcid.org/0000-0001-6431-9094), <https://orcid.org/0000-0001-6431-9094>, rassyd@mail.ru

Осипов Дмитрий Александрович — инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 59536295600](https://orcid.org/0000-0002-9597-0522), <https://orcid.org/0000-0002-9597-0522>, osipovdma09@gmail.com

Тяпкин Михаил Геннадьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 57189248477](https://orcid.org/0000-0002-7859-5580), <https://orcid.org/0000-0002-7859-5580>, tiapkinmg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2025
Одобрена после рецензирования 28.12.2025
Принята к печати 21.01.2026

Authors

Lev N. Rassudov — PhD, Associate Professor, National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 57188955455](https://orcid.org/0000-0001-6431-9094), <https://orcid.org/0000-0001-6431-9094>, rassyd@mail.ru

Dmitriy A. Osipov — Engineer, National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 59536295600](https://orcid.org/0000-0002-9597-0522), <https://orcid.org/0000-0002-9597-0522>, osipovdma09@gmail.com

Mikhail G. Tiapkin — PhD, Senior Researcher, National Research University “MPEI”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 57189248477](https://orcid.org/0000-0002-7859-5580), <https://orcid.org/0000-0002-7859-5580>, tiapkinmg@mail.ru

Received 10.09.2025
Approved after reviewing 28.12.2025
Accepted 21.01.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»