

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

А. Ю. Турыбрин^{1,2}, А. В. Бубнов¹, А. Н. Четверик¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²ООО «Транснефть Надзор» ОП «Омское УСК», г. Омск

Лазерное сканирование представляет собой перспективный метод контроля в строительстве, обеспечивающий высокую точность и скорость измерений. Наземное лазерное сканирование является одним из ключевых инструментов в рамках BIM-технологий, обеспечивая получение точных данных о размере, положении и отклонении объектов. В статье анализируются различные сферы применения наземного лазерного сканирования в строительстве и определяются приоритетные требования к техническим характеристикам оборудования. Отмечается важная роль системы электропривода в обеспечении высокой угловой точности сканирования. Проводится анализ существующих систем лазерного сканирования, технических особенностей применяемых конструкций электропривода, обеспечивающих высокую угловую точность, и определяются основные направления дальнейшего совершенствования систем привода. Рассматривается возможность применения систем управления электроприводом на основе фазовой автоподстройки частоты вращения для снижения затрат на сканирование без снижения угловой точности через оптимизацию конструкции электропривода. Уточняется, как усовершенствование электроприводов может способствовать более широкому применению наземного лазерного сканирования в строительстве.

Ключевые слова: ФАПЧВ, электропривод, наземное лазерное сканирование, BIM-технологии, угловая точность, энкодер, фрикционная муфта, строительный контроль.

Для цитирования: Турыбрин А. Ю., Бубнов А. В., Четверик А. Н. Усовершенствование конструкции электропривода лазерных сканеров на основе анализа особенностей применения сканирующих устройств в строительной отрасли // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 85–94. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-85-94. EDN: UPJTZU.



© Турыбрин А. Ю., Бубнов А. В., Четверик А. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVEMENT OF OPTIMIZATION OF THE DRIVE DESIGN FOR LASER SCANNERS BASED ON THE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF SCANNING DEVICES IN CONSTRUCTION INDUSTRY

A. Yu. Turybrin^{1,2}, A. V. Bubnov¹, A. N. Chetverik¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²LLC "Transneft Nadzor" Omsk Separate division, Omsk, Russia

A laser scanning is a promising method of control in construction, providing high accuracy and speed of measurements. Terrestrial laser scanning is one of the key tools within the framework of Building Information Modeling technology, enabling the acquisition of precise data regarding the size, position, and deviation of objects. The article analyzes various areas of application of terrestrial laser scanning in construction and determines priority requirements for the technical specifications of the equipment. The significant role of the drive system in ensuring high angular accuracy of scanning is emphasized. An analysis of existing laser scanning systems is conducted, focusing on the technical features of drive designs that ensure high angular precision, and the main directions for further improvement of drive systems are determined. The possibility of applying electric drive control systems based on Phase-Locked Loop technology to reduce scanning costs without reducing angular accuracy through the optimization of electric drive design is considered.

It is clarified how the improvement of electric drives can facilitate the wider application of terrestrial laser scanning in construction.

Keywords: PLL, electric drive, terrestrial laser scanning, BIM technologies, angular accuracy, encoder, friction coupling, construction control.

For citation: Turybrin A. Yu., Bubnov A. V., Chetverik A. N. Improvement of optimization of the drive design for laser scanners based on the analysis of characteristics of scanning devices in construction industry. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 85–94. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-85-94. EDN: UPJTZU.



© Turybrin A. Yu., Bubnov A. V., Chetverik A. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Современные тенденции развития микропроцессорной техники и цифровых технологий со все большей автоматизацией различных сфер человеческой деятельности в значительной степени затронуло также и отрасли, непосредственно связанные с проектированием и строительством различных объектов, зданий и сооружений. Современное объектное проектирование осуществляется с применением различных систем автоматизированного проектирования (САПР) и имеет потребность в наличии актуальных исходных данных о местности и пространственном положении зданий и сооружений, окружающих объект проектирования. Проект, полученный с применением САПР, при необходимости в значительной мере позволяет вносить оперативные корректировки с проведением необходимых дополнительных прочностных расчетов уже по ходу реализации проекта на основе данных, полученных в ходе геодезических замеров, выполняемых как в ходе строительства, так и по его завершению. В последние годы широкое распространение получают BIM-технологии моделирования строительных объектов, которые касаются всех уровней жизненного цикла здания, в том числе разработки его проекта и технического задания, строительства, последующей эксплуатации и ремонта. Для эффективной реализации концепций, заложенных в BIM, одним из важнейших аспектов является оперативный и финальный контроль результатов выполненного строительства. Наземное лазерное сканирование (НАС) в условиях развивающихся BIM-технологий получает все большее распространение, поскольку оно позволяет оперативно и в удобной для дальнейшего применения цифровой форме дать представление о фактических размерах и имеющихся отклонениях вновь возводимого либо реконструируемого объекта и облегчить ведение исполнительной документации в цифровом формате.

Основными препятствиями для широкого применения лазерного сканирования в строительстве в настоящее время являются высокая стоимость оборудования и программного обеспечения, уязвимость оборудования к перегрузкам и ударным нагрузкам, а также ориентация производителей на собственное программное обеспечение, что усложняет совместное использование систем разных брендов. Кроме этого, необходимо учитывать специфический фактор, отличающий лазерное сканирование от классических геодезических методов контроля, выраженный в необходимости полной приостановки работ и исключение передвижений персонала в зоне сканирования для получения корректных данных. Это накладывает определенные требования по увеличению скорости выпол-

нения сканирования при сохранении требуемой точности.

Одним из важнейших параметров лазерного 3D-сканера, наряду с точностью измерения расстояний дальномером, является угловая точность измерений, которая напрямую зависит от применяемой в сканере системы электроприводов вращения. Электропривод в лазерных сканерах является ключевым элементом, отвечающим за точное позиционирование лазерного луча в пространстве.

Для оптимизации конструкции электропривода и повышения эффективности работы сканирующих устройств был проведен обзор существующих методов лазерного сканирования и технических характеристик современных лазерных сканеров в корреляции с имеющимися требованиями нормативных документов.

Проведён анализ существующих актуальных систем лазерного сканирования с акцентированием внимания к применяемым конструкциям электропривода, обеспечивающим высокую угловую точность при сохранении динамических характеристик привода. На основе одной из наиболее перспективных конструкций и имеющихся наработок в области прецизионных синхронных электроприводов на принципах фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) предложен вариант доработки электропривода лазерного сканера, потенциально позволяющий повысить скорость сканирования без снижения точности определения углового положения.

2. Цель исследования

В рамках данной работы была поставлена цель провести обзорное исследование основных востребованных направлений использования лазерного сканирования в строительной отрасли с анализом существующих требований нормативных документов, регламентирующих применение лазерного сканирования в строительстве. В ходе проведения анализа выполнить обзор актуальных конструкций существующих систем лазерного сканирования как отечественных, так и зарубежных разработок с определением перспективных направлений дальнейшего развития их конструкций с акцентированием особого внимания к применяемым к механизмам привода и направлениям по оптимизации конструкций их электроприводов. В рамках работы по оптимизации конструкции электропривода лазерного сканера рассмотреть перспективы применения в сканирующих лазерных системах электропривода, построенного на основе принципов фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На основе полученных данных предложить принципиальную конструктивную схему электропривода на основе



Рис. 1. Классификация систем лазерного сканирования
Fig. 1. Classification of laser scanning systems

принципов ФАПЧВ для использования в конструкции лазерного сканера.

3. Основная часть

3.1 Общая классификация и принцип работы лазерных сканеров

Лазерные сканирующие системы можно классифицировать по нескольким основным параметрам, которые оказывают влияние на их применение в различных отраслях строительства (рис. 1) [1, 2].

Отдельно отмечена классификация по принципу действия применяемого дальномера в качестве основной классификации в рамках рассматриваемого вопроса. Принцип работы импульсных сканеров (Time-of-Flight (ToF)) основан на измерении расстояния по задержке излученного и принятого лазерного импульса. Данные сканеры в классическом исполнении обладают средней скоростью работы, эффективной дальностью работы до 1000 м и точностью работы, зависящей от отражающих свойств поверхности с погрешностью около 10 мм. Принцип работы фазового сканера основан на измерении разницы фазы волны между излученным и принятым сигналом. Максимальная дальность ограничена особенностями технологии и не превышает 100 м, данную технологию характеризует высокая скорость сканирования (до 1 миллиона точек/с) при средней точности работы с погрешностью до 10 мм. Принцип действия Триангуляционного сканера основан на измерении углов выхода/приема луча излучателем и приемником, которые расположены на некотором расстоянии друг от друга. Данная технология является наиболее точной (от 0,1 до 1 мм), однако её эффективная дальность не превышает 5 м [1].

Импульсные сканеры с оцифровкой сигнала (цифровой ToF) представляют собой дальнейшее развитие технологии импульсных сканеров, которые, сохранив большую дальность работы, получили существенную прибавку в точности и скорости работы, приблизившись по этим параметрам к фазовым и триангуляционным сканерам. Чаще всего эти технологии, применяемые в сканерах, у каждого производителя имеют свои собственные названия, например, у Leica это Waveform Digitising technology, а у Trimble — Trimble Lightning 3DM.

Согласно приведенным классификациям, для потребностей строительной отрасли наилучшим об-

разом подходят панорамные сканеры, построенные на основе принципа цифрового ToF, поскольку они имеют достаточную точность для выполнения измерений в соответствии с требованиями нормативных документов строительной отрасли и обладают универсальной дистанцией работы, которая может закрыть потребности строительной отрасли.

Кроме приведенных выше классификаций также существуют и другие классификации, в том числе основанные на основополагающих параметрах лазерного сканера, таких как дальность действия, точность, разрешение, скорость сканирования и частота измерения. Требования по данным параметрам предъявляются заказчиком сканирования и зачастую представляют собой корреляцию желаемой детализации результатов лазерного сканирования с финансовыми и временными затратами на их получение и обычно определяются и обосновываются исходя из поставленной задачи и отражаются в техническом задании на проведение лазерного сканирования.

3.2 Примеры применения лазерного сканирования в области строительства

На примерах научных работ, в которых исследуется характер использования лазерного сканирования на строительных объектах, можно выделить два основных направления и специфику использования наземного лазерного сканирования в строительстве:

А. Проведение лазерного сканирования уже существующих объектов и их окружения с целью получения исходных данных для дальнейших проектных работ по реконструкции объектов. Среди этого направления, в свою очередь, можно отдельно выделить:

А1. Сохранение архитектурного наследия. При создании трехмерных цифровых моделей памятников и исторических объектов основной задачей ставится исследование вопросов совместного использования НЛС и фотограмметрии, позволяющее получить облако точек с необходимыми характеристиками для создания параметрической цифровой модели исследуемого объекта, наличие которой позволит более эффективно планировать и выполнять реставрационные работы, а также планировать археологические изыскания [3]. При проведении последующего анализа BIM-модели, полученной с применением лазерного сканирования, могут быть обнаружены дефекты, которые невозможно было

установить ранее путем традиционных архитектурных обмеров и визуальных наблюдений, например, выявлены изменения в расположении несущих металлических балок перекрытия и искривление сводов потолка [4].

А2. Получение исходных данных при проектировании сложных объектов с применением BIM-технологий. Формирование баз данных производственных объектов. Еще одним вариантом применения технологии наземного лазерного сканирования является решение задачи формирования единого источника точных актуальных данных об активах промышленного объекта для последующего обеспечения доступа к данным участникам процессов проектирования, строительства и эксплуатации. Применение таких технологий позволяет выявить и предупредить ошибки проектирования и строительства на ранних этапах, повысив качество выполняемых работ [5].

Использование лазерного сканирования позволяет получить подробную 3D-модель существующих сооружений и окружающих их объектов, которая способствует не только оптимизации проектных работ, что позволяет сократить их длительность примерно на 20 %, но и способна существенно (до 10 %) снизить затраты на устранение ошибок на этапе строительного-монтажных работ, что в итоге удешевляет и ускоряет весь процесс реконструкции [6].

Б. Применение лазерного сканирования для оценки качества строительных работ, создания и контроля исполнительной документации

Использование НЛС при проведении строительного контроля позволяет получать информацию о соответствии объекта требованиям проектной документации в режиме реального времени, что, в свою очередь, позволяет значительно повысить точность и скорость выявления отклонений по каждому конструктивному элементу и дает возможность перенести ведение журнала работ по строительному контролю в информационную модель объекта. Применение НЛС в качестве инструментального метода контроля позволяет определить наличие отклонений строительных конструкций от проектных значений, сделать их качественную и количественную оценку и в сжатые сроки в случае необходимости принять решение о внесении изменений в проект или объ-

ект строительства. Организация рабочих процессов на основе информационной модели, в свою очередь, позволяет свести к минимуму непредвиденные расходы, повысить эффективность проектирования, а использование облака точек, полученного с помощью НЛС, позволяет повысить эффективность контроля за качеством производства строительного-монтажных работ и объединить информацию со строительной площадки и проектную модель в среде общих данных [7, 8].

Таким образом, наземное лазерное сканирование, являясь универсальным методом, применимо как для проведения строительного контроля новых объектов строительства, так и при мониторинге напряженных состояний строительных конструкций зданий и сооружений в период их эксплуатации.

3.3 Требования, предъявляемые к лазерным сканерам. Существующая нормативно-техническая документация (НТД)

На основе анализа различного характера применения НЛС для оценки качества строительного-монтажных работ и оценки текущего технического состояния существующих сооружений можно выделить два основных подхода использования данных, полученных с помощью НЛС, определяющих приоритетные технические параметры лазерных сканеров:

— **получение данных только для определения положения, формы и точных размеров объекта «как факт».** Основной приоритет получают такие параметры, как скорость проведения работ по лазерному сканированию, низкая стоимость выполнения работ и оборудования, универсальность и простота использования оборудования при обеспечении достаточного уровня точности;

— **получение данных для определения отклонений и проведения последующих расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) особо ответственных объектов.** При этом подходе важно получить максимум информации о форме и размерах элементов объекта не только в характерных точках, но и также важно выявить возможное наличие локальных отклонений по исследуемым поверхностям. Основным приоритетным преимуществом уже становится максимальная точность выполнения лазерного сканирования исследуемого объекта с сохранением скорости проведения работ

Таблица 1. Минимальные требования к оборудованию (лазерным сканерам)
Table 1. Minimum requirements for equipment (laser scanners)

№ п/п	Наименование параметра, характеристики	Значение параметра, содержание характеристики			
1	2	3			
1	Диапазон работы	от 0,4 м до 120 м			
2	Разрешающая способность, не менее	1 мм на 10 м			
3	Среднее квадратическое отклонение (СКО) измерения расстояния	1 мм на 10 м	20 %	0,5 мм на 10 м	50 % 80 %
		2 мм на 25 м		1 мм на 25 м	
		3 мм на 50 м		2 мм на 50 м	
		10 мм на 100 м		5 мм на 100 м	
4	Предел допустимой основной средней квадратической погрешности (СКП) измерения углов	не более 14"			
5	Максимальная скорость сканирования	не менее 1 000 000 изм. в сек (1000 kHz)			
6	Поле зрения по вертикали / горизонтали	от 0° до 270° / от 0° до 360 °			
7	Рабочая температура, °С	от минус 20 до плюс 45			
8	Пыле- и влагозащищенность	не ниже IP53 по ГОСТ 14254-2015			

Таблица 2. Технические характеристики рассмотренных сканеров Leica, Trimble, Faro
Table 2. Technical characteristics of the reviewed scanners Leica, Trimble, Faro

	Лазерный сканер	Диапазон работы, м	Разрешающая способность	СКО измерения расстояния	Угловая точность, "	Максимальная скорость сканирования, kHz	Поле зрения по вертикали/горизонтали, °
1	Leica ScanStation P30/P40	0,4 – 120/0,4 – 270	0,8 мм на 10 м	Для 78 % 0,4 мм на 10 м 0,5 мм на 50 м	<8	1000	290/360
2	Leica ScanStation P50	0,4 – 270	0,8 мм на 10 м	Для 78 % 0,4 мм на 10 м 0,5 мм на 50 м	<8	1000	290/360
3	Trimble X9 Premium	0,6 – 150	3 мм на 10 м	Для 80% 1,5 мм на 30 м	<16	1000	282/360
4	Trimble X12	0,3 – 365	0,6 мм на 10 м	Для 80 % 0,2 мм на 10 м 0,25 мм на 25м 0,3 мм на 50 м 0,7 мм на 100 м	<14,4	2187	320/360
5	FARO FOCUS S150 PLUS	0,6 – 150	1,6 мм на 10 м	Для 90 % 0,1 мм на 10 м 0,2 мм на 25 м	<19	2000	300/360
6	FARO FOCUS X130	0,6 – 130	1,6 мм на 10 м	Для 90 % 0,3 мм на 10 м 0,3 мм на 25 м	<15	976	300/360
7	TOPCON GLS-2000	до 210	1 мм на 20 м	Для 90 % 2,0 мм на 150 м	<6	120	270/360
8	Z + F IMAGER 5016	0,3 – 365	1 мм на 10 м	Для 80 % 0,2 мм на 10 м 0,25 мм на 25м 0,3 мм на 50 м 0,7 мм на 100 м	<14,4	1100	320/360

по лазерному сканированию на достаточно высоком уровне.

Среди существующей отечественной нормативно-технической документации по лазерному сканированию наиболее полно и подробно требования к проведению лазерного сканирования с последующим расчетом НДС приведены в действующем руководящем документе ПАО «Транснефть» РД-23.020.00-КТН-099-19. Указанные в данном руководящем документе требования к оборудованию для наземного лазерного сканирования, применяемому на объектах ПАО «Транснефть» (табл. 1), являются достаточно высокими в части требуемой точности измерения, поэтому им полностью соответствует лишь малая часть выпускаемых сканеров. Рассмотрим эту проблему на примере актуальных лазерных сканеров от пяти наиболее популярных производителей (Leica Geosystems [9], Trimble Inc. [10], FARO [11], TOPCON [12], Z + F [13]), сравнительный анализ основных технических характеристик которых приведен в табл. 2. К сожалению, в настоящее время отечественные производители не могут предложить массовые серийные панорамные ToF сканеры и программное обеспечение к ним, сопоставимое по своим возможностям с зарубежными образцами.

Точность выполнения лазерного сканирования исследуемого объекта, прежде всего, зависит от таких параметров, как разрешающая способность, средняя квадратическая ошибка (СКО) измерения расстояния, угловая точность сканирования. Такие параметры, как разрешающая способность и СКО измерения расстояния, определяются непосредственно точностью и скоростью работы используемого лазерного модуля. Угловая точность сканирования в значительной степени зависит

от применяемой в сканере системы привода и точности используемых угловых датчиков — энкодеров. Максимальная скорость сканирования зависит как от непосредственно максимально возможной скорости работы электропривода с требуемой угловой точностью, так и от максимальной скорости выполнения и обработки одного замера дальномерным лазерным модулем.

При проведении анализа было отмечено, что такая характеристика, как угловая точность, у многих современных сканеров на 3–35 % ниже, чем предъявляемые требования, что достаточно сильно снижает выбор подходящего оборудования для проведения наземного лазерного сканирования резервуаров в соответствии с нормативными документами.

Максимальная заявленная угловая точность среди рассмотренных лазерных сканеров достигнута в семействе лазерных сканеров Leica ScanStation P/30/40/50 (8") и в лазерном сканере TOPCON GLS-2000 (6"), однако у последнего заявленная скорость сканирования (120 kHz) значительно уступает другим современным сканерам (500–2000 kHz) и он по своей сути является промежуточным звеном между лазерными сканерами и сканирующими тахеометрами, для которых точность выполнения единичного измерения каждой конкретной точки является приоритетной, а возможность выполнять 3D-сканирование (преимущественно локального участка) является дополнительной.

3.4 Анализ конструкций приводов лазерных сканеров

Электропривод в лазерных сканерах является ключевым элементом, отвечающим за точное позиционирование лазерного луча в пространстве. Основными требованиями к электроприводу являются

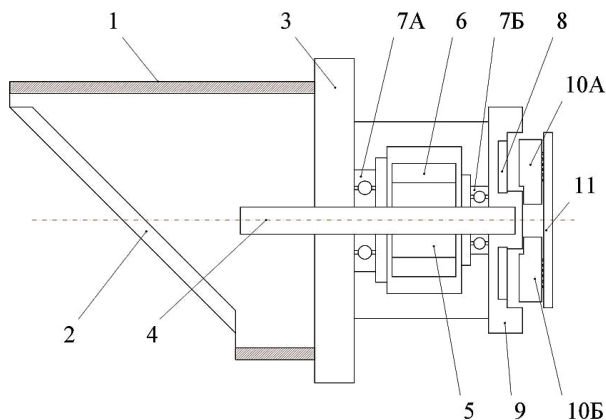


Рис. 2. Конструкция привода отклоняющего устройства сканера FARO: 1 — держатель; 2 — отклоняющее зеркало; 3 — кольцевой диск; 4 — вал; 5 — ротор электродвигателя; 6 — статор электродвигателя; 7А, 7Б — пары подшипников; 8 — энкодер; 9 — корпус; 10А, 10Б — считывающие головки; 11 — печатная плата управления

Fig. 2. Design of the FARO scanner deflection drive:
1 — holder; 2 — deflecting mirror; 3 — annular disk;
4 — shaft; 5 — electric motor rotor;
6 — electric motor stator; 7А, 7Б — bearing pairs;
8 — encoder; 9 — upper structure; 10А, 10Б — reading heads;
11 — control printed circuit board

его управляемость, устойчивость к внешним воздействиям и способность максимально стабильно поддерживать заданную скорость вращения.

Параметры угловой точности оборудования НЛС напрямую зависят от точности энкодеров, используемых в конструкции привода, и общей прецизионной точности изготовления, сборки и балансировки системы электропривода — отклоняющее устройство (лазерный сканирующий модуль). При этом также важно отметить, что с повышением точности и уменьшением допусков значительно повышается себестоимость узла и повышается вероятность получения в ходе эксплуатации повреждений, способных снизить точность оборудования ниже заявленной. Поскольку рассматриваемый сценарий использования оборудования НЛС в строительной отрасли не предполагает создания условий, которые бы в полной мере исключили или минимизировали вероятность получения оборудованием повреждений, вопросы снижения уязвимости оборудования являются одними из важнейших.

На основе актуального патента компании FARO [14] показан пример классической конструкции привода отклоняющего устройства на основе жесткой (прямой) связи между валом электродвигателя и приводимым с его помощью валом с установленным оборудованием (рис. 2). Основным преимуществом подобной конструкции является её компактность, однако такая конструкция привода является в целом менее точной ввиду прямой передачи вибраций, резонансов и отсутствия дублирования информации об углах поворота другим энкодером и, как следствие, она более склонна к снижению точности в процессе эксплуатации ввиду подверженности различным механическим повреждениям в результате случайного воздействия на вращающиеся элементы ввиду их жесткой (либо прямой) связи с электродвигателем.

При проведении анализа актуальных патентов компании Leica Geosystems, касающихся конструкций сервоприводов, которые применяются либо планируются к применению в 3D лазерных скане-

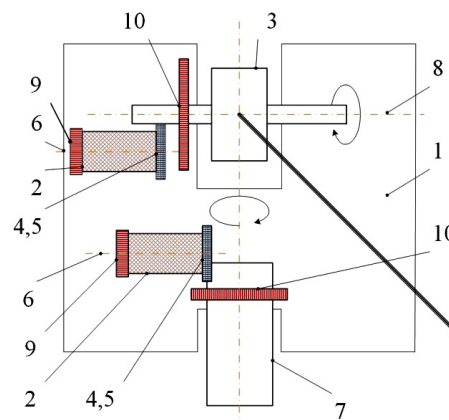


Рис. 3. Принципиальная конфигурация электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems: 1 — корпус сканера; 2 — электродвигатель; 3 — отклоняющий элемент; 4 — редуктор; 5 — фрикционная муфта; 6 — вал электродвигателя; 7 — вал прибора; 8 — вал отклоняющего устройства; 9 — энкодер двигателя; 10 — энкодер прибора

Fig. 3. Basic configuration of electric drives of the Leica Geosystems geodetic instrument:
1 — scanner body; 2 — electric motor;
3 — deflection element; 4 — reducer gearbox;
5 — friction clutch; 6 — electric motor shaft;
7 — device shaft; 8 — deflection device shaft;
9 — motor encoder; 10 — instrument encoder

рах Leica, был отмечен свой оригинальный подход компании к конструированию схемы привода рабочего оборудования.

На основе актуального патента [15] показана принципиальная конфигурация электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems, согласно которой предусмотрено отсутствие жесткой (прямой) связи между валом электродвигателя и приводимым с его помощью валом с установленным оборудованием (рис. 3) и контур управления таким электроприводом (рис. 4). С целью точного определения углового положения в данной конструкции электропривода предусмотрено применение системы из двух энкодеров: расположенного на валу электродвигателя энкодера двигателя и расположенного непосредственно на валу с оборудованием энкодера прибора.

Хотя применение в конструкции фрикционной муфты и повлекло за собой необходимость применения двух энкодеров, оно обеспечило более плавное и точное движение и позволило избежать рывков, резонансов, которые могут повредить точности измерения прибора. Использование двух энкодеров также позволило более быстро, но и при этом с большей точностью осуществлять управляемое изменение скорости вращения с его последующим точным поддержанием за счет оперативной реакции на изменение показаний энкодера двигателя и последующим более точным определением действительных параметров вращения с помощью энкодера, установленного на валу устройства, показания которого также используются как действительные показатели углового положения для построения облака точек.

Отсутствие жесткой связи между валом устройства и электродвигателем позволяет путем сравнения показаний двух энкодеров оперативно выявить начало проскальзывания во фрикционной передаче, возникающее из-за превышения момента электро-

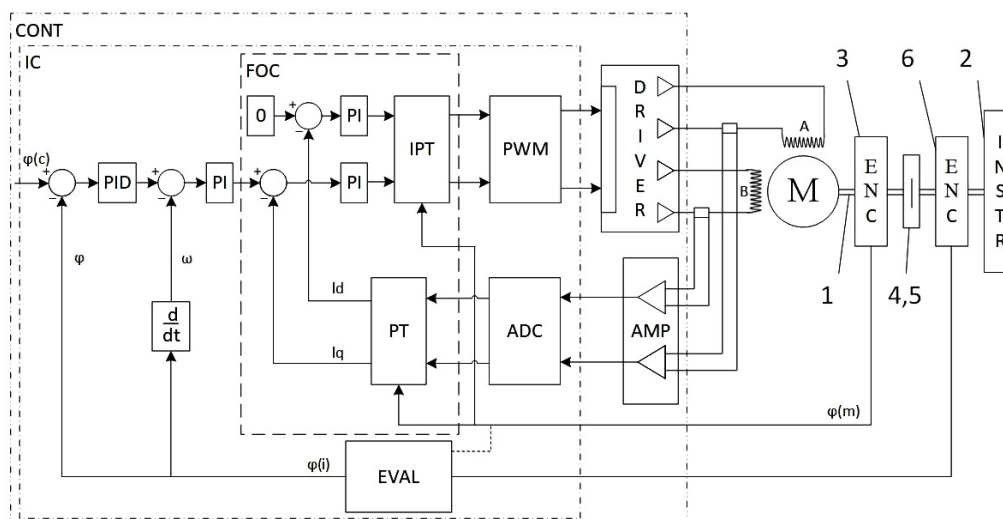


Рис. 4. Контур управления электроприводом прибора Leica Geosystems:
1 — вал электродвигателя; 2 — вал инструмента; 3 — энкодер двигателя; 4 — редуктор;
5 — фрикционная муфта; 6 — энкодер прибора

Fig. 4. Control circuit of the electric drive of the Leica Geosystems device:
1 — electric motor shaft; 2 — instrument shaft; 3 — motor encoder; 4 — gearbox;
5 — friction clutch; 6 — instrument encoder

двигателя при разгоне и/или внешнем воздействии на вращение устройства, что позволяет избежать поломки устройства в результате ударной нагрузки и возросшего крутящего момента из-за действия внешних сил, приложенных к вращающимся элементам конструкции.

С целью снижения стоимости, повышения надёжности и быстродействия рассмотрим возможность модернизации приведенной перспективной конструкции электропривода лазерного сканера Leica Geosystems [15] при помощи применения в её схеме управления принципов фазовой автоподстройки частоты вращения.

3.5 Электроприводы с высокими показателями динамической производительности, основанные на принципах ФАПЧВ

Пришедшие из радиоэлектроники принципы фазовой автоподстройки частоты уже нашли широкое применение в системах управления приводов для эффективного решения задач, связанных с высокочастотными и высокоточными перемещениями/отклонениями. Согласно проведенным исследованиям [16, 17], применение принципов ФАПЧ в системах управления быстрым отклонением зеркала позволяет на 60 % снизить результирующую среднеквадратичную ошибку отслеживания траектории движения лазера по фигуре Лиссажу с опорной частотой 473 Гц по сравнению с традиционными методами при осуществлении сканирования триангуляционным 3D-сканером.

Применение принципов ФАПЧ для решения задач, связанных с меньшими опорными частотами, таких, например, как управление моторным электроприводом, осуществляющим вращение с высокими показателями динамической производительности, ранее уже рассматривалось в научных работах. Был проведен динамический анализ электропривода с цифровым регулятором, построенном на принципах ФАПЧВ и показана его эффективность для построения фазированного электропривода, способного работать, в том числе и в области низких частот вращения вала [18]. Для проведения исследований была разработана компьютерная модель синхрон-

но-синфазного электропривода, позволяющая с высокой точностью моделировать процессы синхронизации электропривода при различных способах регулирования [19]. Предложен способ квазиоптимального по времени управления электроприводом на основе ФАПЧВ, позволяющий улучшить динамические характеристики электропривода в переходных режимах синхронизации [20]. В рамках исследований было доказано, что системы управления, построенные на основе принципов ФАПЧВ, благодаря своей конструктивной простоте, надежности, быстродействию и точности работы на больших частотах вращения, могут значительно повысить эффективность электроприводов, построенных на их основе.

В качестве примера для определения расчетных скоростей работы электропривода примем рабочую скорость вращения оборудования при выполнении сканирования на основе технических характеристик сканера Leica ScanStation P30. Так, при выполнении сканирования с максимальным разрешением 0,8 мм на 10 м скорость вращения вокруг горизонтальной оси составляет ориентировочно 745 об/мин и, в зависимости от выставных параметров скорости сканирования и разрешения, может изменяться до 3000 об/мин при работе от аккумулятора и до 6000 об/мин — при работе от внешнего источника питания. Максимальная же скорость вращения оборудования вокруг вертикальной оси достигается при наименьшем разрешении сканирования (50 мм на 10 м) и составляет 6,1 об/мин. Из этого можно сделать вывод, что рассмотренные в работах [18–20] принципы построения систем управления электроприводом с фазовой синхронизацией на основе принципов ФАПЧВ, предназначенные, в том числе, для работы на низких частотах вращения, в полной мере применимы для построения эффективной системы управления электроприводом лазерного сканера, работающего на оптимальных частотах вращения, и позволяющей при необходимости значительно увеличить частоты вращения без снижения точности управления.

Основными преимуществами электроприводов на основе принципов ФАПЧВ для их эффективного

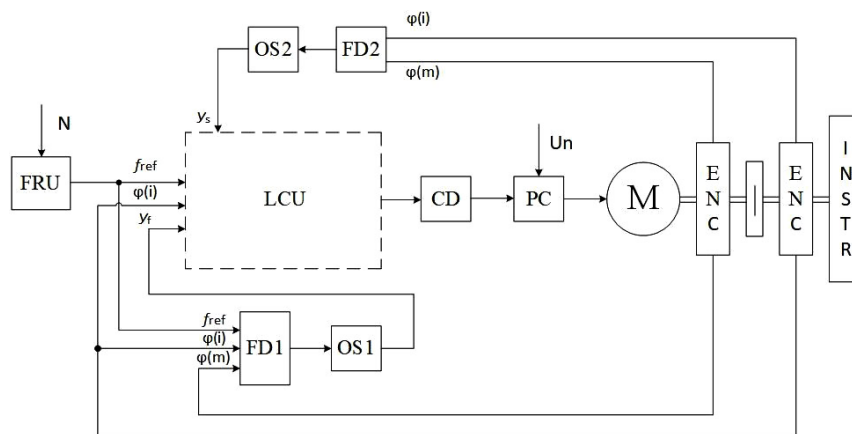


Рис. 5. Контур управления электроприводом с использованием ФАПЧВ
Fig. 5. Electric drive control loop using PLL

применения в конструкции лазерных 3D-сканеров являются:

- идеальный астатизм по скорости, позволяющий достичь максимально высокой точности построения облака точек и обеспечить точное фиксирование их положения в ортогональной системе координат;

- упрощенная схемотехника и элементная база по сравнению с существующими системами управления, обеспечивающая при этом сопоставимую точность и скорость работы электропривода, что позволяет снизить общую стоимость лазерного сканера при сохранении его параметров;

- синхронизация частоты вращения электропривода с заданной опорной частотой, которая привязана к числу импульсов обратной связи с энкодера и не зависит от времени их получения, как следствие повышение частоты вращения не будет оказывать негативное влияние на точность работы системы управления приводом. Это позволит повысить скорости лазерного сканирования без снижения точности и необходимости дополнительных доработок системы управления приводом.

Для подтверждения возможности применения электропривода с системой управления основанной на принципах ФАПЧВ в конструкции лазерного 3D-сканера в среде динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем MATLAB/Simulink был смоделирован предварительный проект схемы электропривода лазерного сканера, выполненный на основе контура управления приводом для принципиальной конфигурации электроприводов геодезического прибора Leica Geosystems [15] с заменой элементов контура управления на элементы цифрового регулятора построенного на принципах ФАПЧВ.

На рис. 5 представлен рассмотренный пример возможной реализации схемы привода сканирующего устройства, основанной на модернизации с использованием принципов ФАПЧВ. Контур управления электроприводом глобально включает в себя блок логического сравнения (LCU) и два контура с частотными дискриминаторами (FD). Основной контур (FD1) отвечает за переключение режимов управления приводом, сравнивая импульсы $\phi(i)$, поступающие с энкодера на валу устройства с импульсами опорной частоты f_{ref} . Вспомогательный контур (FD2) контролирует работу фрикционной муфты, сравнивая импульсы $\phi(i)$ и $\phi(m)$, поступающие с каждого из энкодеров.

Выводы

Развитие вычислительной техники и последующая цифровизация производственных процессов затронули, в том числе, отрасли, непосредственно связанные с проектированием и строительством различных объектов.

Для эффективного использования возможностей САПР требуется как наличие точных и подробных исходных данных о местности, окружающей объект проектирования, так и своевременное получение актуальных данных оперативного контроля промежуточных результатов выполняемого строительства. Наиболее эффективным средством оперативного получения этих данных является НАС. Применение НАС в области строительства накладывает определенные требования к оборудованию, используемому в условиях строительного объекта.

Одним из перспективных направлений развития лазерных сканеров является разработка надежных электроприводов, которые бы обеспечивали контролируемую и повторяемую работу устройств, предохраняя элементы оборудования от вероятных повреждений в условиях строительного объекта. Рассмотренный принцип управления электроприводом лазерного сканера с использованием ФАПЧВ после его дальнейшей проработки позволит снизить стоимость системы управления, сохранив или улучшив её динамические характеристики и точность работы по сравнению с существующими системами.

Применение в электроприводе фрикционной муфты с двумя энкодерами в случае нештатной работы обеспечит оперативное торможение привода при выявлении проскальзывания фрикционной муфты, что повысит общую надежность конструкции в сложных условиях эксплуатации.

Использование в лазерных сканерах электроприводов с системой управления, построенной на основе принципов ФАПЧВ, обеспечит высокую точность и скорость сканирования при меньших требованиях к процессорной и элементной базе системы управления по сравнению с существующими решениями. Снижение себестоимости системы управления с возможностью дальнейшего улучшения технических характеристик систем сканирования, в свою очередь, будет способствовать более широкому применению НАС в строительстве и других областях для повышения качества контроля выполняемых работ.

1. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: Изд-во СГГА, 2009. 261 с.

Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov D. V., Shirokova T. A. Nazemnoye lazernoye skanirvaniye [Terrestrial laser scanning]. Novosibirsk, 2009. 261 p. (In Russ.).

2. Хахулина Н. Б., Нестеренко И. В. Возможности технологий лазерного сканирования для получения геопространственных данных // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2018. № 1 (6). С. 141–149. EDN: VLYHYA.

Khakhulina N. B., Nesterenko I. V. Vozmozhnosti tekhnologiy lazernogo skanirvaniya dlya polucheniya geoprostranstvennykh dannykh [Possibilities of laser scanning technologies for obtaining geophysical data]. Modeli i tekhnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt). *Models and Technologies Environmental Engineering (Regional Aspect)*. 2018. No. 1 (6). P. 141–149. EDN: VLYHYA. (In Russ.).

3. Вареник К. А., Вареник А. С., Храмов Д. Д., Чамеев А. С. Создание цифровой информационной модели Георгиевского собора Юрьева монастыря на основе результатов лазерного сканирования и фотограмметрии // Перспективы науки. 2023. № 4 (163). С. 80–86. EDN: AIMLVR.

Varenik K. A., Varenik A. S., Khramov D. D., Chameyev A. S. Sozdaniye tsifrovoy informatsionnoy modeli Georgiyevskogo sobora Yur'yeva monastyrnya na osnove rezul'tatov lazernogo skanirvaniya i fotogrammetrii [Creation of digital models of St. George's cathedral of the Yuryev monastery using the results of laser scanning and photogrammetry]. *Perspektivy nauki. Science Prospects*. 2023. No. 4 (163). P. 80–86. EDN: AIMLVR. (In Russ.).

4. Шамарина А. А. Сравнительная оценка результатов наземного лазерного сканирования с данными традиционного обследования на примере объекта историко-культурного наследия Доходный дом М. М. Барановой в г. Перми // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 537–541. EDN: ZWVZPP.

Shamarina A. A. Sravnitel'naya otsenka rezul'tatov nazemnogo lazernogo skanirvaniya s dannymi traditsionnogo obsledovaniya na primere ob'yekta istoriko-kul'turnogo naslediya Dokhodnyy dom M. M. Baranovoy v g. Permi [Comparative assessment of ground laser scanning results with traditional survey data on the example of a historical and cultural heritage object M. M. Baranova apartment house in Perm]. *Innovatsii i investitsii. Innovation and Investment*. 2023. No. 5. P. 537–541. EDN: ZWVZPP. (In Russ.).

5. Шарафутдинова А. А., Брын М. Я. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26, № 1. С. 57–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. EDN: UONPQL.

Sharafutdinova A. A., Bryn M. Ya. Opyt primeneniya nazemnogo lazernogo skanirvaniya i informatsionnogo modelirovaniya dlya upravleniya inzhenernymi dannymi v techeniye zhiznennogo tsikla promyshlennogo ob'yekta [The experience in using laser scanning and building information modeling for engineering data management during the life cycle of an industrial object]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2021. Vol. 26, no. 1. P. 57–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. EDN: UONPQL. (In Russ.).

6. Комиссаров А. В., Ремизов А. В. Методика использования BIM-технологий и лазерного сканирования для реконструкции и модернизации объектов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27, № 2. С. 115–124. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124. EDN: NHUFEV.

Komissarov A. V., Remizov A. V. Metodika ispol'zovaniya BIM-tekhnologiy i lazernogo skanirvaniya dlya rekonstruktsii i modernizatsii ob'yektov [Application bim-technologies and laser scanning for reconstruction and modernization of objects]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2022. Vol. 27, no. 2. P. 115–124. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124. EDN: NHUFEV. (In Russ.).

7. Богданов А. Н., Листратов Я. А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 401–409. EDN: BRIRDS.

Bogdanov A. N., Listratov Ya. A. Stroitel'nyy kontrol' metodom nazemnogo lazernogo skanirvaniya [Construction control by ground laser scanning]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019. No. 4 (50). P. 401–409. EDN: BRIRDS. (In Russ.).

8. Могучев С. Б. Строительный контроль с использованием облака точек и информационной модели здания // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 580–589. EDN: AORUME.

Moguchev S. B. Stroitel'nyy kontrol' s ispol'zovaniyem oblaka tochek i informatsionnoy modeli zdaniya [Building control using point cloud and building information model]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2022. No. 6 (90). P. 580–589. EDN: AORUME. (In Russ.).

9. 3D laser scanning Leica. *Leica Geosystems*. URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/scanners> (accessed: 02.03.2025).

10. Terrestrial 3D laser scanning and imaging systems. *Trimble Inc.* URL: <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/laser-scanning> (accessed: 02.03.2025).

11. FARO Focus Laser Scanning Solution. *FARO*. URL: <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> (accessed: 02.03.2025).

12. Laser Scanners TOPCON. *Topcon Corp.* URL: <https://mytopcon.topconpositioning.com/na/support/products/5255> (accessed: 02.03.2025).

13. Terrestrial 3D laser scanner Z+F. *Zoller + Fröhlich GmbH*. URL: <https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner> (accessed: 02.03.2025).

14. Kramer A., Ossig M., Becker R. Method of obtaining a reference correction value for an index mark of an angular encoder. US Patent 9,759,583; filed April 29th, 2015; published September 12th, 2017.

15. Müller B., Schmitt T. L., Herbst C., Wachter H. M. Drive system in a geodetic measurement instrument. US Patent 2021/0055104; filed August 20th, 2020; published February 25th, 2021.

16. Csencsics E., Schitter G. Design of a phase-locked-loop-based control scheme for Lissajous-trajectory scanning of fast steering mirrors. *2017 American Control Conf. (ACC)*. 2017. P. 1568–1573. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963176.

17. Csencsics E., Ito S., Schlarp J., Schitter G. System Integration and Control for 3D Scanning Laser Metrology. *IEEE Journal of Industry Applications*. DOI: 10.1541/ieejia.8.207. Vol. 8 (2). P. 207–217.

18. Bubnov A., Daynovich A. Digital automatic control system of phase-lock motor drive. *2017 Dynamics of Systems, Mechanics and Control Processes*. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239439

19. Bubnov A. V., Chudinov A. N., Chetverik A. N., Shpineva V. I. Development and Investigation of a Computer Model of a Synchronous-in-phase Electric Drive. *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601446. EDN: WTXZPX.

20. Bubnov A. V., Chetverik A. N., Chudinov A. N., Schekochikhin A. V. Development of Control Methods of Phase-

locked Electric Drive with Improved Dynamic Performance. 2019 *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944729.

ТУРЫБРИН Артем Юрьевич, аспирант кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; ведущий инженер ООО «Транснефть Надзор» ОП «Омское УСК», г. Омск.

SPIN-код: 9258-9815

AuthorID (РИНЦ): 1234858

ORCID: 0009-0008-7287-4811

ResearcherID: KBC-9069-2024

Адрес для переписки: art-turibrin@mail.ru

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5358-0661

AuthorID (РИНЦ): 250020

ORCID: 0000-0002-0604-3795

ResearcherID: A-6669-2015

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2930-8935

AuthorID (РИНЦ): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: O-4913-2017

Адрес для переписки: anchetverik@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 03.04.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.

TURYBRIN Artem Yuryevich, Postgraduate at the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk; Leading Engineer of LLC "Transneft Nadzor" Omsk Separate division, Omsk.

SPIN-code: 9258-9815

AuthorID (RSCI): 1234858

ORCID: 0009-0008-7287-4811

ResearcherID: KBC-9069-2024

Correspondence address: art-turibrin@mail.ru

BUBNOV Aleksey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5358-0661

AuthorID (RSCI): 250020

ORCID: 0000-0002-0604-3795

ResearcherID: A-6669-2015

Correspondence address: bubnov-av@bk.ru

CHETVERIK Alina Nailevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2930-8935

AuthorID (RSCI): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: O-4913-2017

Correspondence address: anchetverik@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 03.04.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.