

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8983

УДК 674.093.6.053

*Статья*

## **Разработка цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора для контроля износа режущего инструмента**

**Пшеничников Михаил Андреевич**

*аспирант, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация),  
pysh0@yandex.ru*

**Галактионов Олег Николаевич**

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет  
(Российская Федерация), ong66@mail.ru*

*Получена: 29 сентября 2025 / Принята: 30 октября 2025 / Опубликована: 3 декабря 2025*

---

**Аннотация:** В статье представлен процесс разработки цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора и предлагается усовершенствованный метод контроля напряжений и токов в питающих электролиниях обрабатывающего оборудования, оснащённого электрическим приводом. Рассматриваемое устройство построено на основе концентратора магнитного поля, изготовленного в лабораторных условиях из магнитомягкого аморфного материала и датчика Холла. В статье кратко описан цикл разработки устройства, итогом которого является создание опытного образца, который был испытан в производственных условиях. Возможности применения устройства в лесопромышленном комплексе достаточно широки как с точки зрения типов оборудования, так и установленной мощности. На данном этапе разработки устройство позволяет с достаточной точностью измерять электрические характеристики в питающих линиях дереворежущего оборудования и оценивать состояние режущего инструмента. Получаемые данные обрабатываются непосредственно в устройстве и преобразуются в цифровой вид, что даёт большой потенциал для их дальнейшей обработки и использования. Возможности программирования устройства и добавление модулей позволяют направить работу устройства на решение задач потребителя, дистанционная передача данных на сервер в дальнейшем позволит применить методы обработки больших данных для выработки и коррекции режимов эксплуатации оборудования. Контрольные исследования работоспособности устройства проведены на сетевом оборудовании в г. Петрозаводске и показали

высокую чувствительность к колебаниям нагрузки на электроприводе. Длительные испытания разработки будут проведены на ленточнопильной установке лесопильного предприятия с целью установления возможности заблаговременного выявления предельного износа зубьев пильных лент. Применение устройства позволит автоматизировать оборудование на небольших предприятиях и использовать его на маломощном оборудовании.

**Ключевые слова:** цифровой трансформатор тока; лесная промышленность; магнитный концентратор; обработка древесины

---

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8983

*Article*

## **Development of a digital current transformer based on magnetic concentrator for the cutting tool wear control**

**Mikhail Pshenichnikov**

*Graduate student, Petrozavodsk State University (Russian Federation), pysh0@yandex.ru*

**Oleg Galaktionov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), ong66@mail.ru*

*Received: 29 September 2025 / Accepted: 30 October 2025 / Published: 3 December 2025*

---

**Abstract:** The article presents the process of developing a digital current transformer based on a magnetic concentrator and proposes an improved method for monitoring voltages and currents in power lines of processing machinery equipped with an electric drive. The device is based on a magnetic field concentrator manufactured in the laboratory from a soft magnetic amorphous material and a Hall sensor. The article briefly describes the development cycle of the device resulted in a prototype creation to be tested in production conditions. The device application possibilities in the forestry complex are quite wide regarding equipment types and installed capacity. At this stage of development the device allowed measuring electrical characteristics in the power lines of wood-cutting equipment with sufficient accuracy and assessing the condition of the cutting tool. The obtained data was processed directly in the device and converted into digital form, which provides great potential for their further processing and use. The programming capabilities of the device and the addition of modules allow using the device to solve consumer problems. Remote data transmission to the server in the future will allow applying big data processing methods to develop and correct equipment operating modes. Control studies of the device operability were conducted on network equipment in the city of Petrozavodsk and showed high sensitivity to load fluctuations on the electric drive. Long-term tests of the development will be conducted on a band sawing machine of a sawmill enterprise to detect well in advance the wear

limit of saw blade teeth. The use of the device will allow equipment in small low power enterprises to operate automatically.

**Keywords:** digital current transformer; forest industry; magnetic concentrator; wood processing

---

## 1. Введение

Сегодня внедрение цифровых технологий контроля и управления происходит во всех сферах деятельности человека. Модернизация деревообрабатывающего оборудования не находится в стороне от этого процесса. Цифровизация контроля и управления режущими инструментами позволяет полнее использовать их технологические возможности, которые состоят в организации оперативного управления режимами процессов резания, экономии энергетических ресурсов, сокращении расходов на обслуживание инструментов и станков. В направлении внедрения инструментов контроля имеется много исследований, но реализовать их в полной мере пока не удалось [1]. В настоящее время имеется большой парк цифровых устройств, программных средств, специалистов-разработчиков и эксплуатантов, целью деятельности которых является реализация контроля и управления производственными системами, а также оптимизация производственных процессов. Крупные производства в первую очередь активно используют автоматизированные системы управления технологическими процессами и являются основными заказчиками и движителями внедрения микроконтроллерной техники и контрольных систем на её базе. Высокоточные цифровые приборы на основе встроенных микроконтроллеров с установленным программным комплексом открывают широкие возможности также для средних и малых предприятий. Одновременно с внедрением контрольных систем активно происходит освоение и внедрение стандартов и протоколов сбора, передачи и представления результатов контроля на различных предприятиях. Например, в ходе развития сферы энергоснабжения на основе микроконтроллерной техники появились как понятие «цифровая подстанция», так и сами цифровые подстанции [1—3]. Такая подстанция представляет собой передовую, практически полностью автоматизированную установку, в которой информация о состоянии, обмене, контроле над протекающими процессами на станции происходят автоматизировано в цифровом виде и дистанционно доставляются на центральный пульт управления.

## 2. Материалы и методы

Цифровые технологии проникают практически во все сферы производства и, в частности, в лесной комплекс России. Лесной комплекс включает несколько областей — деревообрабатывающую, целлюлозно-бумажную и лесохимическую. Уровень IT-развития упомянутых сфер и степень внедрения автоматизированного управления в них неоднородны и идут неравномерными темпами. ЦБП имеет, в среднем, наиболее крупные и концентрированные производства, использует наиболее мощные станки и оборудование, применяет процессы, использующие высокие температуры, давления и просто опасные вещества. Для перекачки пульпы и растворов применяются большое количество электродвигателей, регуляторов частоты вращения и других параметров, систем защиты и автоматики, приборы учёта. Для согласования работы всех этих устройств используются измерительные системы и приборы, которые служат для обеспечения бесперебойной и безопасной работы устройств

и производства в целом. Масштабы производства позволяют использовать достаточно дорогие решения и, следовательно, для контроля и управления технологическими процессами широко применяется самая широкая номенклатура устройств [4]. Лесохимическое производство делится на две части: большую, действующую на базе ЦБП и пользующуюся всем спектром достоинств, предоставляемых данным производством; малую, которая направлена на переработку, в основном, древесной зелени и использует оборудование существенно меньших мощностей, а также характеризуется меньшим уровнем применения средств автоматизации. Лесохимическое производство практически отсутствует в исследованиях, посвящённых его автоматизации, хотя в нём используются довольно сложные и даже опасные процессы типа «взрывного гидролиза» [5]. Деревообрабатывающее производство имеет очень широкую гамму оборудования, как по мощности, так и по назначению. В лесопилении используются высокоматематизированные гибкие системы и ведутся постоянные работы по их совершенствованию [6], в то же время применяются маломощные установки, имеющие ручные регулировки [7] с минимальной автоматизацией.

Лесопиление как часть деревообрабатывающей промышленности представляет собой обширное пространство для внедрения новых способов контроля состояния, прежде всего, режущего инструмента. В работе [8] предлагается расчётный метод определения времени между переточками ленточных пил. Однако современный уровень развития и многообразия контрольных датчиков позволяет определять время переточки непосредственно в процессе работы станка или инструмента.

Аналогичный вывод можно сделать при знакомстве с работой [9], в которой исследуется износ фрез при обработке стеклотекстолита на разных режимах резания. Установлен характер роста износа задней поверхности зуба и рекомендовано поддерживать размер фаски износа не более 0,3 мм. По результатам исследований сформулирована математическая модель стойкости фрезерования стеклотекстолита в зависимости от режимов резания и геометрии резца. Сделанные выводы могут стать основой для разработки управляющих программ для цифровых трансформаторов тока на основе концентратора магнитного поля.

В работе [10] исследовалась стойкость ножей рубительной машины и её влияние на общую производительность процесса. В качестве контрольного инструмента использовался вес переработанной в щепу древесины. Установлено, что из-за низкой стойкости ножей длительность технологического цикла (подача круглых лесоматериалов в рубительную машину и полная загрузка грузовика готовой щепой) увеличилась на 34,2 %. Таким образом, использование средств, позволяющих оперативно контролировать состояние режущего инструмента, сделает возможным повысить эффективность производства.

Исследование [11] посвящено аналогичной теме и приводит к схожим выводам, с важным замечанием о заметном снижении качества щепы по мере затупления ножей рубительной машины. Система управления, позволяющая оценить состояние ножей и вовремя выдать рекомендацию об их переточке, будет способствовать решению нескольких задач: повысить

производительность, увеличить срок жизни ножей, снизить энергозатраты и повысить качество щепы.

В выводах статьи [12] содержится замечание об отсутствии влияния на качество образуемой поверхности, однако этот вывод не исключает повышения энергозатрат на пиление по мере затупления зубьев круглой пилы.

В работе [13] отмечается, что основным последствием затупления зубьев пил является увеличение энергоёмкости процессов пиления, проявляющееся в повышении мощности, затрачиваемой на пиление, и увеличении крутящего момента на валу двигателя пильного диска. Так как оба эти параметра будут проявляться через повышение величины тока в питющем кабеле, то возможность его измерить является важной и достаточно информативной характеристикой.

В отличие от работы [12] в статье [14] однозначно отмечено снижение качества поверхности при пилении пилами с затупленными зубьями, таким образом, целесообразно использование автоматического контроля отслеживания затупления пил для обеспечения стабильного качества продукции лесопиления.

Выводы, содержащиеся в статье [15], открывают некоторые дополнительные возможности, в частности, контроль оптимальных режимов резания при пилении круглыми пилами. В этой работе изучено влияние расстояния выхода пильного диска из пропила над пластью на износ диска и показано, что малый выход способствует меньшей жизнеспособности пильного диска.

Подводя итог данного обзора, можно сделать вывод, что наибольшую эффективность даст применение цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля на мощных установках типа рубительных машин, но с точки зрения распространённости целесообразно ориентироваться на пильные установки для продольного и поперечного резания.

Таким образом, сформулируем проблему следующим образом: необходима разработка системы управления работой лесопильных станков на основе организации контроля состояния узлов и деталей и, в первую очередь, режущих инструментов — зубьев, ножей, фрез и т. д. на основе оперативного анализа состояния оборудования. В данном исследовании такой основой для создания контрольно-измерительных систем лесопильных и деревообрабатывающих станков является цифровой трансформатор тока на основе концентратора магнитного поля [16].

Работы по использованию цифровых трансформаторов тока на основе концентратора магнитного поля ведутся достаточно широко. Например, в работе [17], рассматриваются возможности применения таких концентраторов в космическом приборостроении для использования в малых космических аппаратах, что характеризует диапазон условий применения. Так как одной из главных задач производства является контроль состояния электроприводов, то цифровой трансформатор тока на основе концентратора магнитного поля, в состав которого входят чувствительный элемент и микроконтроллер с программным

обеспечением, предназначен, прежде всего, для измерения уровня тока в питающей линии электропередачи. Основным чувствительным элементом устройства является датчик Холла, эффективность работы которого повышается за счёт использования концентратора магнитного поля, изготовленного из металлического стекла. Металлические стёкла обладают свойством повышения концентрации магнитного поля, формируемого током, протекающим через измеряемый проводник, вблизи датчика Холла. Для обеспечения возможности включения устройства в общую систему контроля и управления в него включён микроконтроллер с необходимым программным обеспечением, позволяющим обработать и передать сигнал с датчика Холла в общую сеть предприятия, в накопитель, оператору для принятия оперативных решений по работе контролируемого оборудования (см. рисунок 1).

Рассмотрим общие сведения о цифровых трансформаторах тока на основе магнитного концентратора. Для измерения величины тока с помощью традиционного трансформатора с классическим датчиком Холла необходим ферромагнитный магнитопровод, охватывающий измеряемый проводник, а магнитопровод должен иметь воздушный зазор, в котором расположен чувствительный элемент. К слабым сторонам таких датчиков относятся: ограниченный диапазон рабочих частот, высокая температурная погрешность, существенные размеры и вес, недостаточное быстродействие. Принцип действия цифрового трансформатора тока основан на использовании эффекта Холла. Этот эффект является частным случаем проявления силы Лоренца — воздействия магнитного поля на заряженную частицу. Эффект Холла служит основой для разработки соответствующих датчиков — твердотельных устройств, генерирующих электрические сигналы, пропорциональные локальному магнитному полю [4]. В предлагаемом устройстве вместо громоздкого магнитопровода для точной фокусировки магнитного поля на датчике Холла применяется концентратор магнитного поля, изготовленный из аморфного магнитомягкого материала. Эти материалы обладают рядом характеристик, которые позволяют широко их использовать: малая необходимая масса, снижение габаритов, увеличение диапазона рабочих температур — от  $-60$  до  $+125$   $^{\circ}\text{C}$ , повышенная надёжность и стабильность характеристик, достаточно высокая точность, увеличенный коэффициент полезного действия. Бурное развитие современной электроники и рост требований к размерам привёл к использованию магнитомягких материалов в различных сферах электроники, например, в трансформаторах и датчиках тока, фильтрах ЭМ помех, измерительной технике, системах передачи данных (Ethernet) и т. д. [5]. Использование магнитомягких материалов позволяет отказаться от громоздких магнитопроводов и ограничиться применением малогабаритных концентраторов, что положительно скажется на уровне концентрации магнитного поля на чувствительном элементе датчика Холла. Для эффективной работы цифрового трансформатора тока следует подобрать такой вид аморфного магнитомягкого материала и форму магнитного концентратора, которые позволят достаточно точно сфокусировать магнитный поток на датчике Холла в заданных условиях применения. Концентратор магнитного поля может иметь различные формы, каждая из которых отвечает оптимальным условиям работы в конкретной системе измерения. Форма может

моделироваться в специальных программах, позволяющих спроектировать вид концентрации и максимальное магнитное насыщение концентратора. Например, широкое распространение имеют спаренные концентраторы, состоящие из двух элементарных концентраторов, между которыми размещён чувствительный элемент [6]. Сигналы, генерируемые датчиком Холла, обрабатываются микроконтроллером с программным обеспечением для передачи и анализа данных, полученных при измерении.

В результате цифровой преобразователь, работающий на основе магнитного поля, получает ряд преимуществ перед традиционными устройствами: он обеспечивает высокую скорость работы, точность и компактность, может быть настроен под конкретные задачи потребителя.

Индукция магнитного поля, генерируемого током в проводнике, составляет следующую величину:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot R} \text{ Тл,} \quad (1)$$

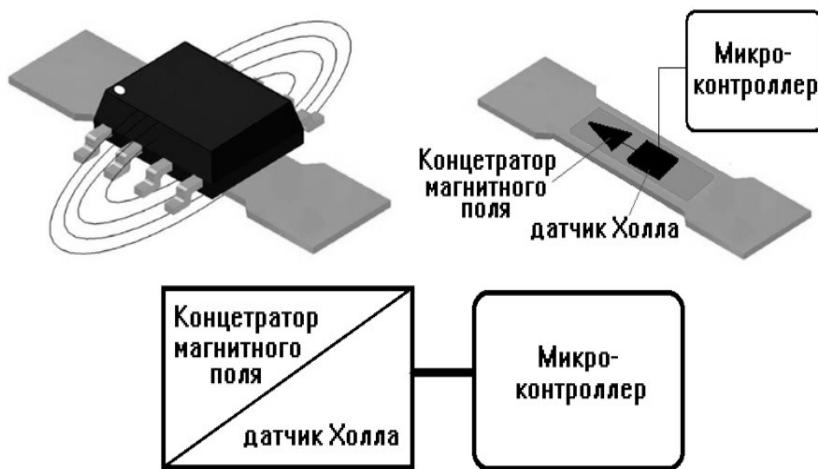
где  $\mu_0$  — магнитная постоянная, Гн/м;  $R$  — расстояние от поверхности проводника до концентратора, м.

При этом величина магнитной индукции вблизи вершин концентратора составит:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot R} \text{ Тл,} \quad (2)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость материала концентратора, для аморфного материала АМАГ 186 составляет 2100 Гн/м.

Общая схема цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Общая схема цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля [рисунок авторов]

**Figure 1.** General diagram of a digital current transformer based on a magnetic field concentrator

Создание цифрового трансформатора тока на основе устройства, концентрирующего магнитное поле, позволит измерять переменный ток с частотой 50 Гц в сети питания любого оборудования напряжением до 0,6 кВ. Уникальность разработки заключается в том, что цифровой трансформатор тока на основе устройства, концентрирующего магнитное поле, имеет компактные размеры. Это позволяет использовать его в труднодоступных и ограниченных пространствах. Кроме того, устройство обеспечивает высокую точность и быстродействие, что позволяет более точно контролировать показатели тока в сетях.

### 3. Результаты

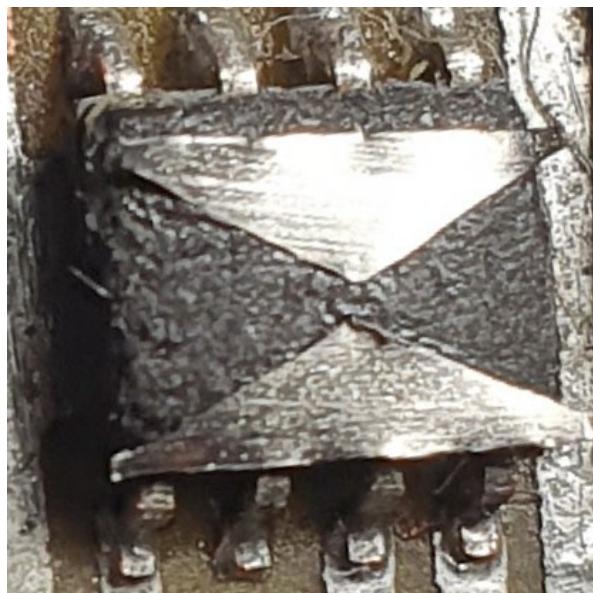
Методика разработки контрольно-измерительной системы на базе цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора:

1. Определить требуемые диапазоны точности и быстродействия системы измерения, выявить оптимальный режим функционирования цифрового преобразователя. Для большинства лесопильных установок измеряемое напряжение ограничивается 0,6 кВ, диапазон измеряемого тока от 6 до 17 А, режимы работы — нормальный режим минимальных нагрузок и нормальный режим максимальных нагрузок.
2. Разработать эскиз внешнего вида цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора, учитывающий особенности монтажа и работы установки в условиях высокой запылённости среды и вибонагруженности.
3. Разработать внутреннюю конструкцию корпуса цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора, учитывающую необходимость монтажа компонентов на виброизолированные опоры.
4. Выбрать материал для магнитного концентратора — аморфный магнитомягкий материал АМАГ 186С [21], использование которого в трансформаторах тока позволяет повысить точность измерения, обеспечить независимость от характеристик тока нагрузки.
5. Выбор формы для магнитного концентратора. Концентраторы магнитного поля (потока) представляют собой элементы определённой формы и конкретного состава для «фокусирования» (концентрирования) магнитного поля. Они часто используются для усиления магнитного поля в той области, где данное магнитное поле должно улавливаться датчиком магнитного поля — датчиком Холла. Коэффициент магнитного усиления ( $k$ ) пропорционален отношению длины концентратора ( $lk$ ) к длине зазора ( $lz$ ) в соответствии с формулой

$$k = \frac{lk}{lz}. \quad (3)$$

Для исследования совместно с датчиком Холла следует использовать магнитный концентратор треугольной формы [16], [17]. При этом применяться будут два концентратора одинаковой формы и размера, направленные друг на друга и располагающиеся параллельно плоскости датчика Холла.

6. С учётом всего вышесказанного изготовлен экспериментальный образец магнитного концентратора, который представлен на рисунке 2.



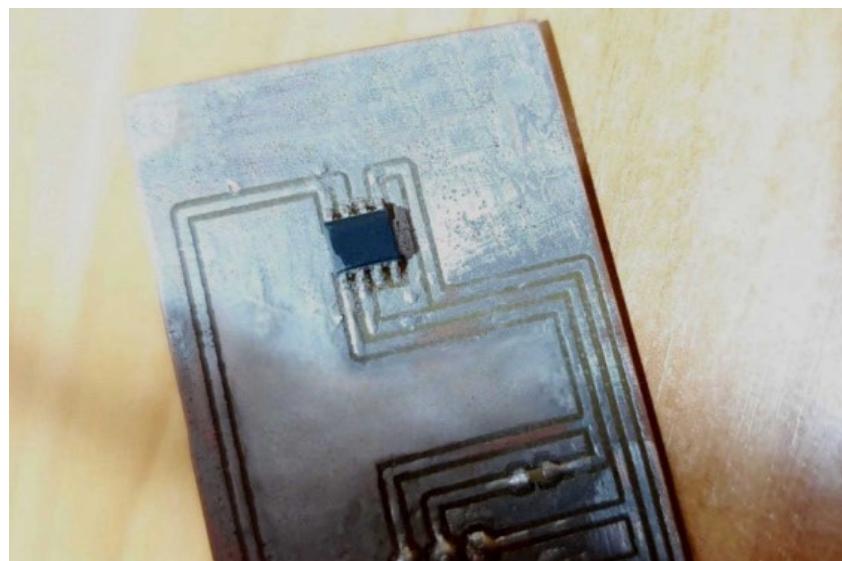
**Рисунок 2.** Концентратор магнитного поля из аморфного магнитомягкого материала  
[рисунок авторов]

**Figure 2.** Magnetic field concentrator made of amorphous soft magnetic material

7. Выбор датчика. Из множества датчиков аналогичного назначения выбран датчик Холла AD 22151 с униполярным подключением, применение обусловлено его конструкцией, которая позволяет настраивать чувствительность, задавать напряжение смещения на выходе. Кроме того, микросхема обладает сбалансированно-высокой магнитной чувствительностью, линейностью преобразования и стабильностью основных характеристик в широком диапазоне температур использования. Данная микросхема позволяет установить концентратор произвольной формы с возможностью его адаптации и наладки под конкретные задачи потребителя.

8. Создание преобразующего элемента. В данном устройстве этот элемент является базовым измерительным или чувствительным, его работа основана на связке магнитного концентратора и датчика тока. Для разработки чувствительного элемента цифрового трансформатора тока необходимо создать плату, на которой будет размещен датчик Холла, соединённый с концентратором магнитного поля. В программе EasyEDA 6.5.1 создана электронная схема платы. Затем выполнен стандартный набор операций: схемы скопированы на текстолитовую основу, проведены травление и очистка соединительных линий. После этого выполнено лужение и установлены необходимые компоненты: датчик Холла, соединённый с концентратором магнитного поля, конденсаторы и резисторы. Внешний вид платы на одной из стадий разработки представлен на рисунке 3. Затем концентратор

магнитного поля на датчике Холла был покрыт защитным составом для предотвращения нежелательного контакта с воздухом и активными средами, деформации и защиты компонентов от вибрации. Расположение концентраторов магнитного поля на поверхности микросхемы AD 22151 базируется на большом количестве экспериментов, в которых изучалась работоспособность чувствительного элемента при различном расположении концентратора магнитного поля, что привело к выбору спаренного встречно-направленного треугольного концентратора магнитного поля, расположенного на поверхности микросхемы [16].



**Рисунок 3.** Внешний вид платы [рисунок авторов]

**Figure 3.** The board exterior

9. Тестирование и калибровка чувствительного элемента цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора. Проведены тестовые замеры и определены характеристики чувствительного элемента. При выборе биполярной схемы подключения и отсутствии напряжённости внешнего поля, которое необходимо измерить, напряжение на выходных контактах платы составило 2,53 В, что соответствует половине напряжения питания платы, согласно техническому руководству к датчику Холла — AD 22151 [18]. Напряжение питания платы 5 В. Это соотношение напряжений свидетельствует о технической функциональности платы и говорит о корректной работе платы. Определим характеристику чувствительного элемента — коэффициент усиления датчика.

$$g = 1 + \frac{R_3}{R_2} * 0,4 \frac{\text{мВ}}{\text{Гс}} = 4,2 \quad (4)$$

Для учёта постоянных магнитных и электромагнитных полей проведена калибровка оборудования, учитывающая их влияние.

10. Выбор микроконтроллера для обработки данных чувствительного элемента цифрового трансформатора тока. На основе сформулированных ранее требований по скорости обработки данных и анализа литературного обзора [20], а также базируясь на опыте предыдущих разработок, было принято решение использовать микроконтроллер STM32F103C8T [19]. Питание микроконтроллера и микросхемы AD 22151 реализовано независимо.

11. Выбор языка программирования. Для разработки программного обеспечения микроконтроллера использован язык программирования C++. Данный язык программирования снабжён большим количеством программных библиотек, позволяющих решить все возникающие задачи при разработке цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля.

12. Разработка программного обеспечения для микроконтроллера цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля. Программный код должен обеспечивать обработку получаемых данных от чувствительного элемента и расчёта тока без потерь данных, а также учёт магнитных и электромагнитных полей для исключения их влияния. Для экспериментального образца цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля сформирован необходимый код, реализующий методику аналого-цифрового преобразования входного сигнала в величину действующего значения тока электроустановки.

13. Сборка опытного образца системы. На данном этапе разработан образец цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля. Собрана его аппаратная часть. В едином корпусе расположены плата чувствительного элемента, микроконтроллер, провода для их соединения и выводной кабель для подключения устройства к питающей сети и компьютеру, выступающему в роли визуализатора измеряемых процессов и накопителя данных. В нижней части корпуса, которая соприкасается с токопроводом, изготовлено технологическое отверстие, служащее для проведения измерений. Оно позволяет получить доступ к чувствительному элементу — концентратору магнитного поля, который находится на датчике Холла. Сверху цифрового трансформатора находится герметичная крышка. Она защищает устройство от пыли и влаги, которые могут попасть внутрь корпуса.

14. Испытание работоспособности системы. Выполнено подключение аппаратной составляющей экспериментального образца цифрового трансформатора тока, который использует концентратор магнитного поля, к источнику питания. После проверки и окончательной сборки аппаратной части образца цифрового трансформатора тока проведена проверка работоспособности с подключением его к микроконтроллеру и плате чувствительного элемента, микроконтроллер соединён с ПК через переходник.

15. Тестирование. Тестирование экспериментального образца цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля проведено в реальных условиях, осуществлён анализ результатов тестирования. Выбран электропривод: модель и название — LOWARA PLM132B14S3/3110; тип двигателя и подключения — трёхфазный, тип подключения — через преобразователь частоты; мощность 5,5 кВт; напряжение 380 В; измерители тока — мульти-

метр цифровой EKF MS18C и датчик, установленный на преобразователе частоты электродвигателя сетевого насоса.

Итоги результатов испытаний в реальных условиях приведены в таблице, содержащей значения измеренных токов фазы А. За приближенные к идеальным значения взяты показания преобразователя частоты электродвигателя сетевого насоса. Измерения мультиметром завышают показания почти на 5,0 %, измерения экспериментальным образцом цифрового трансформатора тока занижают показания на 1,0 %. Разница измерений между показаниями мультиметра и образца цифрового трансформатора тока составила почти 6 %, что является неприемлемым значением.

Разница измерений между показаниями датчика преобразователя частоты и образца цифрового трансформатора тока укладывается в диапазон погрешности измерительного прибора.

**Таблица.** Результаты измерений тока электродвигателя сетевого насоса

**Table.** Current measurement results of the electric motor of the mains pump

Средство измерения	Ток фазы А, А	Разница, %
Преобразователь частоты	10,1	—
Мультиметр	10,61	+ 5,04
Образец цифрового трансформатора тока	9,99	- 1,00

На основе полученных данных можно сделать вывод, что образец цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля прошёл реальные испытания и показал результаты, сравнимые с другими, в т. ч. заводскими, измерителями тока. Следовательно, использование образца цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля возможно на других промышленных объектах, в частности, на лесопильном и деревообрабатывающем оборудовании, для контроля за электрическими параметрами технологических процессов.

#### 4. Обсуждение и заключение

В составе лесопромышленного комплекса Российской Федерации деревообрабатывающая отрасль особенно подходит для внедрения цифровых трансформаторов тока на основе концентратора магнитного поля. Использование цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля особенно эффективно для контроля состояния режущих инструментов. Это достаточно дорогие и расходные элементы любой дереворежущей установки, требуют регулярного обслуживания и обеспечивают необходимое качество продукции. Цифровой трансформатор тока на основе концентратора магнитного поля не требует глобального изменения конструкции станков и оборудования. Он прост в монтаже и настройке. Его можно использовать для управления электродвигателями, регуляторами частоты вращения, в системах защиты и автоматики, а также в приборах учёта. Внедрение

разработанного устройства в оборудование лесопромышленного комплекса позволит улучшить контроль параметров технологических процессов, обеспечить их бесперебойную работу и своевременную замену и обслуживание. Появятся возможности оперативного аварийного отключения при возникновении проблем на производстве, например, заклинивания режущего инструмента. Применение цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля позволит после соответствующей настройки и калибровки с высокой точностью измерять и контролировать параметры электрической системы деревообрабатывающего, целлюлозно-бумажного и лесохимического производства. В целом, это позволит более тщательно вести учёт потребления электроэнергии и выявлять слабые и сильные стороны производства.

В данной статье продемонстрирован сокращённый алгоритм создания цифрового трансформатора тока на основе магнитного концентратора, обоснованы и выбраны материал и форма концентратора магнитного поля, датчик Холла, изготовлена плата, выбрано и согласовано программное и аппаратное обеспечение. Разработка показала хорошие результаты при опытном тестировании в производственных условиях. Необходимы более длительные исследования и работа на лесопильном оборудовании в условиях производства. Результаты измерений соответствуют измерениям приборов, основанных на иных принципах работы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 075-03-2023-128.*

## Список литературы

1. *Rakhmatullin S. S. Modern organization of digital channel communication for relay protection and emergency control // Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation in English: In 3 parts. Saint Petersburg, 2024.* P. 82—86.
2. Повышение эффективности и надёжности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС / А. В. Мокеев, С. А. Пискунов, Д. Н. Ульянов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. С. 92—100.
3. Логинов А. А. Организация цифровой релейной защиты // Научно-образовательный потенциал молодёжи в решении актуальных проблем XXI века. Красноярск, 2021. № 17. С. 218—220.
4. Даденков Д. А., Солодкий Е. М., Гусманов О. Р. Автоматизация поиска дефектов бумажного полотна с использованием системы машинного зрения // Научно-технический вестник Поволжья. Технические науки. 2018. № 5. С. 197—199. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-197-199.
5. Развитие малого лесохимического производства на кластерной основе / А. В. Мехренцев, Э. Ф. Герц, А. Ф. Уразова [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 2 (85). С. 83—90. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54376543> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
6. Прокофьев Г. Ф., Микловчик Н. Ю., Тюрин А. М. Новые лесопильные модули для использования в гибких автоматизированных лесопильных линиях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 1 (349). С. 131—137. URL: [https://lesnoizhurnal.ru/-](https://lesnoizhurnal.ru/)

apxiv/2016/%D0%9B%D0%96%201\_2016.pdf (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.

7. Алексеева Л. В. Коэффициент использования лесопильного потока малой мощности на базе однопильного ленточнопильного станка // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 2. С. 92—96. URL: <https://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/7d2/7d24b2e-264c606818897ae8dd3bf090f.pdf> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
8. Прокофьев Г. Ф., Коваленко О. Л. Определение времени периодичности заточки (переточки) зубьев ленточных пил // Лесной вестник. 2023. № 1. С. 134—138. DOI: 10.18698/-2542-1468-2023-1-134-138.
9. Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Архипов П. В. Износостойкость режущего инструмента, оснащенного особомелкозернистым твердым сплавом, при фрезеровании стеклотекстолита // Системы. Технологии. 2023 № 3. С. 25—30. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30.
10. The Effect of Knife Wear and Sharpening Mode on Chipper Productivity and Delays / M. Mihelič, D. Vusić, B. Ursić [et al.] // Forests. 2024. No. 15. P. 1101. URL: <https://doi.org/10.3390/f15071101> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
11. Nati C., Spinelli R., Fabbri P. G. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use // Biomass Bioenergy. 2010. No. 34. P. 583—587. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.-01.005.
12. Kminiak R., Gašparík M., Kvietková M. The dependence of surface quality on tool wear of circular saw blades during transversal sawing of beech wood // BioRes. 2015. No. 10 (4). P. 7123—7135. DOI: 10.15376/biores.10.4.7123-7135.
13. Kováč J., Mikleš M. Research on individual parameters for cutting power of woodcutting process by circular saws // Journal For. Sci. 2010. No. 6. P. 271—277. DOI: 10.17221/94/2009-JFS.
14. Magoss E. General Regularities of Wood Surface Roughness // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. 2008. No. 4. P. 81—93. DOI: 10.37045/aslh-2008-0008.
15. Šustek J., Siklienka M. Effect of saw blade overlap setting on the cutting wedge wear // Acta Facultatis Xilologicae Zvolen. 2012. No. 1. P. 73—80. URL: [https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/08-1-12-sustek-siklienka\\_1.pdf](https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/08-1-12-sustek-siklienka_1.pdf) (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
16. Пищеничников М. А. Применение цифрового трансформатора тока на основе концентратора магнитного поля в лесопромышленном комплексе России // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы VIII Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2022. С. 162—163. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_49563414\\_17047402.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_49563414_17047402.pdf) (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
17. Прокошин В. И., Ярмолович В. А., Драпезо А. П. О разработке и применении концентраторов магнитного потока для устройств микромагнитоэлектроники // Вестник БГУ. Серия 1: Физика. Математика. Информатика. 2014. № 2. С. 39—43. URL: <https://elib.bsu-by/handle/123456789/113550> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
18. АО «ЧИП и ДИП». Техническая документация к датчику Холла AD 22151. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/301/DOC000301415.pdf> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
19. АО «ЧИП и ДИП». Техническая документация к микроконтроллеру STM32F103C8T6. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/481/DOC026481463.pdf> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
20. Назаров П. А., Аблаев А. Т. О выборе магнитопроводов устройств с датчиками Холла // Электричество 2. М.: Энергоиздат, 1981. С. 69—71.

21. ПАО «МСТАТОР». Новые горизонты. Свойства выпускаемых аморфных лент на основе кобальта П. 2021. URL: <https://www.mstator.ru/ru/> (дата обращения: 13.01.2023). Текст: электронный.
22. Xu Sun, Lijun Jiang, Philip W. T. Pong. Magnetic flux concentration at micrometer scale // Microelectronic Engineering. 2013. Vol. 111. P. 77—81.
23. Интегрирующий аналого-цифровой датчик нулевого тока / Л. Цытович, М. М. Дудкин, О. Брылина [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. № 37. С. 93—96.

## References

1. Rakhmatullin S. S. Modern organisation of digital channel communication for relay protection and emergency control. *Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation in English: In 3 parts*. Saint Petersburg, 2024, pp. 82—86.
2. Mokeev A. V., Piskunov S. A., Ulyanov D. N., Khromtsov E. I. Increasing the efficiency and reliability of RPA of digital substations and digital RPS. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, 2020, pp. 92—100. (In Russ.)
3. Loginov A. A. Organisation of the digital relay protection (in Russian). *Scientific and educational potential of the youth in the solution of the urgent problems of the XXI century*. Krasnoyarsk, 2021, no. 17, pp. 218—220. (In Russ.)
4. Dadenkov D. A., Solodkiy E. M., Gusmanov O. R. Automation of paper web defects search using the machine vision system. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. Technical sciences*, 2018, no. 5, pp. 197—199. doi: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-197-199. (In Russ.)
5. Mekhrentsev A. V., Hertz E. F., Urazova A. F., Belyaeva V. N., Avdyukova O. D. Development of small-scale timber and chemical production on a cluster basis. *Forests of Russia and management in them*, 2023, no. 2 (85), pp. 83—90. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54376543> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
6. Prokofiev G. F., Miklovtsik N. Yu., Tyurin A. M. New sawmill modules for use in flexible automated sawmill lines. *Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniye. Forestry journal*, 2016, no. 1 (349), pp. 131—137. Available at: [https://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2016/%D0%9B%D0%96%201\\_2016.pdf](https://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2016/%D0%9B%D0%96%201_2016.pdf) (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
7. Alekseeva L. V. Utilisation coefficient of a sawmill flow of small capacity on the basis of a singlesaw band sawing machine *Izvestiya vysshee obrazovaniye vysshee obrazovaniye. Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 92—96. Available at: <https://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/7d2/7d24b2e264c606818897ae8dd3bf090f.pdf> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
8. Prokofiev G. F., Kovalenko O. L. Determination of the periodicity time of sharpening (resharpening) of band saw teeth. *Lesnoy vestnik*, 2023, no. 1, pp. 134—138. doi: 10.18698/-2542-1468-2023-1-134-138. (In Russ.)
9. Rychkov D. A., Lobanov D. V., Arkhipov P. V. Wear resistance of the cutting tool equipped with a particularly fine-grained hard alloy during milling of glasstextolite // Systems. Methods. Technologies, 2023, no. 3, pp. 25—30. doi: 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30. (In Russ.)
10. Mihelič M., Vusić D., Ursić B., Zadro A., Spinelli R. The Effect of Knife Wear and Sharpening Mode on Chipper Productivity and Delays. *Forests*, 2024, no. 15, pp. 1101. Available at: <https://doi.org/10.3390/f15071101> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic.

11. Nati C., Spinelli R., Fabbri P. G. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass Bioenergy*, 2010, no. 34, pp. 583—587. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.-01.005
12. Kminiak R., Gašparík M., Kvietková M. The dependence of surface quality on tool wear of circular saw blades during transversal sawing of beech wood. *BioRes*, 2015, no. 10 (4), pp. 7123—7135. doi: 10.15376/biores.10.4.7123-7135.
13. Kováč J., Mikleš M. Research on individual parameters for cutting power of woodcutting process by circular saws. *Journal For. Sci.*, 2010, no. 6, pp. 271—277. doi: 10.17221/94/2009-JFS.
14. Endre Magoss General Regularities of Wood Surface Roughness. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2008, no. 4, pp. 81—93. doi: 10.37045/aslh-2008-0008.
15. Šustek J., Siklienka M. Effect of saw blade overlap setting on the cutting wedge wear. *Acta Facultatis Xilologicae Zvolen*, 2012, no. 1, pp. 73—80. Available at: [https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/08-1-12-sustek-siklienka\\_1.pdf](https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/08-1-12-sustek-siklienka_1.pdf) (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic.
16. Pshenichnikov M. A. Application of the digital current transformer based on the magnetic field concentrator in the timber industry complex of Russia. *Improving the efficiency of forestry complex: Materials of VIII All-Russian national scientific practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2022, pp. 162—163. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_49563414\\_17047402.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_49563414_17047402.pdf) (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
17. Prokoshin V. I., Yarmolovich V. A., Drapezo A. P. About the development and application of magnetic flux concentrators for micromagnetoelectronics devices. *BSU Vestnik. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics*, 2014, no. 2, pp. 39—43. Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/113550> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
18. JSC «CHIP and DIP». Technical documentation for Hall sensor AD22151. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/301/DOC000301415.pdf> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
19. JSC «CHIP and DIP». Technical documentation for microcontroller STM32F103C8T6. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/481/DOC026481463.pdf> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
20. Nazarov P. A., Ablaev A. T. About the choice of the magnetoproducts of the devices with the Hall sensors (in Russian). *Elektrichestvo* 2. Moscow, Energoizdat, 1981, pp. 69—71. (In Russ.)
21. PJSC «MSTATOR». New Horizons. Properties of produced amorphous ribbons on the basis of cobalt P. 2021. Available at: <https://www.mstator.ru/ru/> (accessed: 13.01.2023). Text. Image: electronic. (In Russ.)
22. Xu Sun, Lijun Jiang, Philip W. T. Pong. Magnetic flux concentration at micrometer scale. *Microelectronic Engineering*, 2013, vol. 111, pp. 77—81.
23. Tsytovich L., Dudkin M. M., Brylina O., Matsin V. Integrating analoguedigital zerocurrent sensor. *Bulletin of South Ural State University. Series: Energetics*, 2023, no. 37, pp. 93—96. (In Russ.)