

## ИЗМЕРЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Эта статья о перспективах развития альтернативной энергетики, роли преобразовательной техники, существующих и разрабатываемых методах оценки потерь индуктивных элементов, работающих в импульсной или резонансной преобразовательной технике и применяемых в энергокомплексах на основе возобновляемых источников энергии. В статье рассматриваются существующие методы оценки потерь в индуктивных элементах и границы их применимости. Рассматриваются новые решения, направленные на улучшение методологии и метрологии измерений. Даются рекомендации по минимизации потерь.

**Ключевые слова:** измерение потерь, индуктивные элементы, генератор тока, разделение потерь, оптимизация индуктивных элементов, преобразовательная техника, возобновляемые источники энергии, микроГЭС.

**Введение.** Одним из приоритетов развития энергетики в Российской Федерации является альтернативная энергетика. Её развитие обусловлено не только экологическими аспектами загрязнения окружающей среды углеводородной энергетикой, но и экономической составляющей. Именно экономический аспект развития альтернативной энергетики является в последнее время основным мотивирующим фактором как в странах Западной Европы, так и в других развитых регионах мира, например в Китае. Стоимость решений для альтернативной энергетики в последнее десятилетие значительно снизилась и достигла уровня ископаемых видов топлива [1]. Для Российской Федерации применение альтернативных источников энергии имеет особую важность ввиду удалённости многих небольших населённых пунктов от сетей центрального энергоснабжения. Доступность и качество энергоснабжения таких населённых пунктов можно значительно улучшить именно за счет использования возобновляемых источников энергии.

Важным фактором эффективности альтернативной энергетики является снижение влияния естественных природных циклов и погодных явлений

на доступность энергоснабжения, а также суточные колебания и пики нагрузки потребителей. Эти факторы могут значительно снижать эффективность применения альтернативных источников в особенности в автономных и изолированных системах, так как требуют установку избыточных мощностей для покрытия пиковых нагрузок и учёта погодных факторов. Перспективным решением данной проблемы стало использование гибридных систем с накоплением энергии, которые запасают излишки энергии в часы минимума нагрузок и восполняют её недостаток по необходимости. В настоящее время наиболее популярным видом накопителя энергии является использование литий-ионных аккумуляторов, обладающих высокой плотностью энергии, низким саморазрядом и длительным сроком службы. Этот тип аккумуляторов хорошо подходит как для частного сектора, так и для промышленности [2].

**Цель исследования.** Альтернативная энергетика использует гидравлическую, солнечную, ветровую и другие виды энергии возобновляемых источников окружающей среды. Сложностью использования этой энергии является большой разброс параметров каждого из источников и, как следствие, слож-

ность согласования этих источников с нагрузкой. Решением данной задачи является использование специального согласующего оборудования, обеспечивающего соответствие нестабильного, меняющегося в широком диапазоне напряжения первичного источника с требованиями потребителя или накопителя энергии. Таким согласующим оборудованием являются различного рода электронные преобразователи частоты и напряжения, выполненные с использованием полупроводниковых приборов, индуктивных и прочих элементов. Характеристики этих преобразователей напрямую отражаются на коэффициенте полезного действия как самого альтернативного источника, так и систем накопления энергии, потому что потери в преобразователе вычитаются из общей доступной энергии. Особенно чувствительными к потерям преобразования являются системы накопления энергии ввиду необходимости двойного преобразования в цикле накопления и отдачи энергии. Как показывает практика, доля потерь в индуктивных элементах или связанных с ними потерь может достигать до 30 % всех потерь преобразования энергии. Ввиду этого, задача оптимизации индуктивных элементов представляется важной для целей расширения возможностей эффективного использования альтернативной энергетики.

**Основная часть.** Созданная в стенах Национального исследовательского университета «МЭИ» на кафедре гидромеханики и гидравлических машин молодёжная лаборатория автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС (лаборатория микроГЭС) занимается углублённым изучением вопросов создания современных и энергоэффективных источников альтернативной энергетики и систем управления к ним. В 2023 г. на базе лаборатории проведена углублённая модификация стенда микроГЭС выходной мощностью до 700 Вт с целью повышения её эффективности и создана система управления, позволяющая стабилизировать выходные напряжение и частоту при различных уровнях расхода воды через турбинную часть микроГЭС, а также при изменении электрической нагрузки от холостого хода до максимума. Для повышения общей эффективности избыток электрической энергии аккумулируется в виде тепловой энергии, которая может использоваться для целей отопления и горячего водоснабжения. Созданная лабораторная установка выгодно отличается тем, что позволяет исследовать процессы и методы тригенерации, что особенно важно для работы автономных систем тепло- и электроснабжения. На рис. 1 представлена базовая конфигурация автономного комбинированного источника энергии. В базовой конфигурации автономная система имеет возможность обеспечивать потребителей электрической энергией в пределах доступной мощности гидроагрегата и накапливать избытки мощности в виде тепловой энергии в тепловом накопителе.

Устройства стабилизации и преобразования напряжения и тока являются важной составной частью практически всех современных электронных систем. От их характеристик в значительной мере зависит коэффициент полезного действия системы в целом. В основу подавляющего большинства преобразователей заложены индуктивные элементы [3], которые позволяют легко изменять как уровень выходного напряжения, так и плавно регулировать форму тока. Знание и умение применять современные технологии в области разработки индуктивных

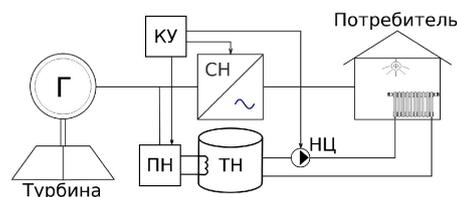


Рис. 1. Турбина — гидротурбина, Г — генератор, СН — стабилизатор напряжения, ПН — преобразователь напряжения, ТН — тепловой накопитель, НЦ — насос циркуляционный, КУ — контроллер управления

элементов является важным аспектом для эффективного решения задач повышения коэффициента полезного действия и миниатюризации преобразователей и создания конкурентоспособной и современной продукции. Разработчик также должен иметь точный измерительный инструмент для сравнения характеристик преобразователей, который позволяет осуществлять итерационный процесс исследования с целью поиска оптимальных инженерных решений.

Индуктивные элементы в электронных схемах выполняют роль накопителей энергии, которая временно сохраняется в магнитном поле, созданном током обмотки. Для усиления магнитного поля используют ферромагнитные сердечники, которые за счет повышенной магнитной проницаемости позволяют значительно увеличить плотность энергии катушки. В процессе работы преобразователей в индуктивных элементах происходит быстрое чередование фаз забора энергии из первичного контура источника и передачи её во вторичный контур приёмника. Таким образом, весь поток энергии проходит через индуктивный элемент и его магнитное поле. Часть передаваемой энергии при этом теряется и переходит в тепло, вызывая нагрев самого индуктивного элемента, что приводит к снижению коэффициента полезного действия преобразователей. Надо заметить, что потери возникают не только в обмотке и в материале сердечника самого индуктивного элемента. Паразитная ёмкость и нелинейность индуктивного элемента вызывает сопутствующие потери и в других элементах преобразователей.

Причиной возникновения потерь является несколько факторов [4]. При прохождении тока в обмотке индуктивного элемента происходит выделение тепла на омическом сопротивлении, вызывая её нагрев. Сопротивление провода возрастает с увеличением температуры. Разница омических потерь в холодном и нагретом состоянии, соответствующем рабочему режиму, может составлять до 40 % и более. Переменная составляющая тока обмотки вытесняется к поверхности проводника, что снижает его эффективное сечение, и сопротивление переменному току значительно повышается. Это явление называется скин-эффектом, который сильно возрастает с увеличением частоты. Взаимное влияние токов в соседних проводниках обмотки (эффект близости) также вызывает увеличение эквивалентного сопротивления обмотки индуктивного элемента за счёт неравномерного перераспределения токов по сечению проводника [5].

В современных преобразователях частота тактирования уже перешагнула порог в 100 кГц. Спектр тока при импульсном регулировании содержит значительную часть высших гармоник, что в совокуп-

ности увеличивает потери от скин-эффекта и эффекта близости.

Возникновение магнитных потерь обусловлено затратами энергии на перемагничивание материала сердечника (гистерезис) и возникновение вихревых токов в нём. Магнитные потери в значительной степени зависят от выбора материала сердечника, частоты перемагничивания и амплитуды переменной составляющей тока. Ввиду того, что часть силовых линий выходит из сердечника, часть потерь локализуется в проводящих материалах конструкции или окружающих проводящих материалах. Особенно заметен этот эффект при наличии зазоров в сердечнике, необходимых для задания определенных свойств магнитного контура. Магнитное поле, выходя из зазора, вызывает нагрев материала обмотки и других проводящих элементов конструкции за счёт вихревых токов.

Наличие паразитной ёмкости присуще всем электронным компонентам. Но именно в индуктивных элементах паразитная ёмкость обмотки может достигать высоких значений. Это обусловлено как большими размерами самих индуктивных элементов, так и большой площадью обмоток. Паразитная ёмкость — это не только собственная ёмкость обмотки индуктивного элемента, но и ёмкость между обмоткой или сердечником и корпусом прибора. Наличие паразитной ёмкости вызывает косвенные потери, так как потерями в материале диэлектрика этой паразитной ёмкости можно пренебречь. При высоком напряжении и частоте преобразования потери энергии на перезаряд этой ёмкости становятся заметными. Ёмкость дросселя вызывает появление высокочастотных паразитных колебаний при каждой коммутации. Энергия паразитных колебаний не участвует в процессе передачи энергии и рассеивается на элементах схемы и выходных фильтрах.

Практический интерес представляет также исследование характеристики изменения индуктивности от величины тока и температуры сердечника. Наиболее часто используемым материалом сердечника является феррит. Ферриты обладают низкими потерями и хорошими частотными характеристиками. При использовании ферритов необходимо учитывать быструю потерю ими магнитной проницаемости при приближении к точке насыщения и сильную зависимость положения точки насыщения от температуры. Два эти фактора приводят к необходимости создания значительных резервов при проектировании индуктивных элементов с использованием ферритов.

Из выше сказанного видно, что задача измерения и оптимизации параметров индуктивного элемента является задачей сложной, с множеством факторов, взаимно влияющих друг на друга. Решение данной задачи важно не только для удовлетворения потребностей разработчиков электронной аппаратуры, но также имеет важное значение для целей производства и контроля качества продукции.

Чтобы решить задачу оптимизации необходимо иметь возможность измерять параметры индуктивных элементов. Достаточно распространёнными для этой цели являются приборы, позволяющие быстро измерить величину потерь на малом сигнале, так называемые LCR-метры [6–7]. Они позволяют измерить величину индуктивности, добротность и тангенс угла потерь в отсутствие тока смещения (подмагничивания сердечника). Но ввиду того, что свойства индуктивного элемента меняются при появлении тока смещения за счет наличия петли

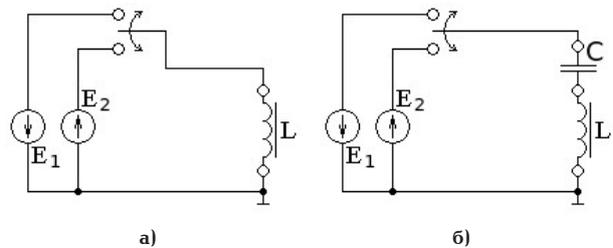


Рис. 2. Принцип действия импульсного а) и резонансного б) генераторов.  $E_1$  и  $E_2$  — независимые источники напряжения,  $C$  — резонансный конденсатор,  $L$  — испытуемый образец

гистерезиса, LCR-метры не годятся для комплексной оценки потерь. Для решения этой задачи есть профессиональные приборы, позволяющие проводить измерения при различных токах смещения [8]. Но полученные таким образом данные также отличаются от потерь в реальном устройстве, хотя и дают больше информации о характеристике индуктивного элемента. Причина наличия различий заключается в методике измерения при малом сигнале, который не вызывает нагрев обмоток и сердечника индуктивного элемента, соответствующий реальному режиму эксплуатации. Искусственный подогрев индуктивного элемента также не даёт полноты картины, так как в реальности нагрев различных частей сердечника и обмотки не является однородным и разные участки обмотки и сердечника работают в разных температурных режимах.

Из этого следует, что для решения задачи измерения и оптимизации требуется устройство, которое моделировало бы работу индуктивного элемента в готовом изделии, т.е. работало бы с полными рабочими токами и напряжениями. Это позволило бы в реальном времени оценить и измерить потери в индуктивном элементе, исследовать распределение тепла, обнаружить зоны повышенного тепловыделения, проверить эффективность охлаждения, исследовать характеристику насыщения. Проведение таких измерений особенно важно на начальном этапе проектирования, когда нет ещё готового устройства и нет возможности провести проверку предлагаемых образцов индуктивных компонентов на практике. В отсутствие возможности проведения измерений образцов используют приблизительные расчёты, основываясь на справочной информации, а проверка всей системы происходит на финальном этапе разработки [9]. При таком подходе и ввиду временных ограничений по срокам проекта часто не удаётся провести оптимизацию индуктивных элементов.

Работы по созданию тестовых импульсных и резонансных генераторов тока для целей измерения и оптимизации индуктивных элементов велись в МЭИ ещё в начале 2000-х годов и были успешно реализованы совместно с немецкой высшей школой г. Констанц (Германия) [10]. В настоящее время выпускают подобных тестовых генераторов тока занимается немецкая фирма Renergy-Sys. Её генераторы способны работать на токах до 100 А и частотах до 200 кГц при напряжении до 400 В и позволяют решать широкий круг вопросов, связанных с практическими испытаниями индуктивных элементов.

Принцип работы тестовых генераторов представлен на рис. 2. В генераторах имеются независимые источники  $E_1$  и  $E_2$ , которые при помощи силовых ключей попеременно подключаются

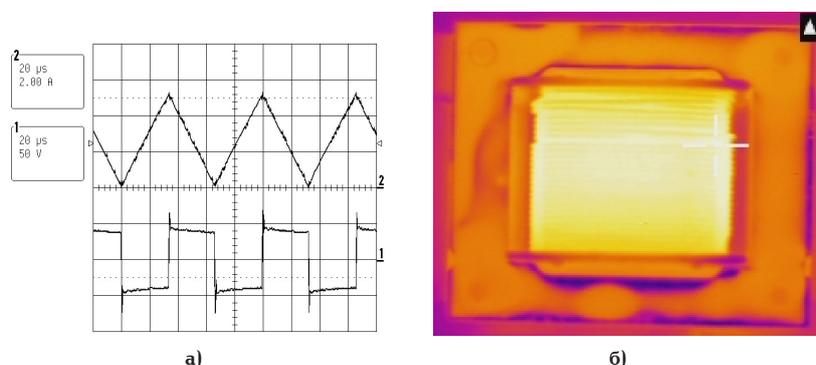


Рис. 3. а) форма тока канал 2 и напряжения канал 1 на исследуемом образце в импульсном режиме, б) термографическое изображение исследуемого образца

к испытываемому индуктивному элементу  $L$ , создавая в нём ток заданной формы и частоты. В импульсном генераторе путём изменения напряжений источников  $E_1$  и  $E_2$  варьируется скорость нарастания и спада тока в индуктивном элементе. Регулируя максимум и минимум тока, а также скорость его нарастания можно регулировать частоту тока. В резонансном генераторе резонансная частота задаётся при помощи конденсатора  $C$ . Амплитуда тока в индуктивном элементе регулируется напряжением источников  $E_1$  и  $E_2$ . Переключение ключа происходит в момент, когда ток индуктивного элемента близок к нулю.

Временная диаграмма тока индуктивного элемента и напряжения на нём, полученные при испытании на импульсном генераторе, представлены на рис. 3а. На временной диаграмме напряжения отчётливо виден колебательный процесс после каждого переключения, который обусловлен большой паразитной ёмкостью обмотки. Термографическое изображение испытываемого образца, на котором отчётливо видно распределение потерь, представлено на рис. 3б. Основные потери в данном эксперименте возникают в проводниках обмотки и обусловлены их высоким сопротивлением, высокочастотным составляющим тока. Анализ термографического изображения позволяет визуально обнаружить основной источник потерь. Но такой анализ не всегда удобен, так как не даёт полноты картины, не даёт количественной оценки и требует наличия дорогостоящего оборудования.

Наиболее перспективным методом анализа индуктивных элементов представляется измерение мощности потерь электрическими методами. В первых экспериментах для измерения мощности потерь применялся классический метод ваттметра. Как известно, мощность потерь при несинусоидальной форме тока и напряжения можно определить, перемножив мгновенные значения напряжения на индуктивном элементе и тока через него с последующим интегрированием результата [11]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt.$$

Низкая точность такого метода состоит в большом (около двух порядков) соотношении передаваемой через индуктивный элемент реактивной мощности и величиной потерь в нём. При использовании метода ваттметра для получения погрешности измерения мощности потерь не более 10 % точность измерения полной мощности должна быть не менее 0,1 %. При этом недостаточно иметь соответствующие разрешения по точности для измерения тока

и напряжения. Крайне важно обеспечить минимальный сдвиг по времени и фазе сигналов в цепях измерения тока и напряжения в широком частотном диапазоне (до 1 МГц и выше), что является сложной задачей ввиду отличий в реализации каналов измерения различных величин и на разных диапазонах измерения. Даже с использованием дорогостоящих измерительных приборов и при точном соблюдении методики измерений не удаётся достичь желаемой точности, так как временные сдвиги различных измерительных каналов не остаются постоянными во времени и сильно зависят от температуры. Если всё же удаётся получить устойчивое измерение, возникает вопрос калибровки измерительного оборудования, так как установившиеся значения набега фаз неизвестны, а образцовые индуктивные компоненты с заданными параметрами потерь не выпускаются. Методом ваттметра удаётся произвести измерения с удовлетворительной точностью только для индуктивных элементов, имеющих заметные потери на частотах до 1 кГц, что очень далеко от потребностей современной преобразовательной техники.

Неудачные попытки проведения прямых измерений привели к разработке методик косвенной оценки потерь. Одним из вариантов решения стало измерение общей потребляемой мощности генератора тока совместно с индуктивным элементом. Ввиду того, что питание генератора тока осуществляется на постоянном токе, само измерение не представляет особой сложности. Недостатком метода, конечно, является включение в результат потерь на силовых ключах. Если генератор тока выполнить на полевых транзисторах, в режиме малых токов можно пренебречь потерями самого генератора ввиду низкого сопротивления канала и низкими динамическими потерями. С возрастанием тока потери в ключах растут в квадратичной зависимости, а полевые транзисторы имеют сильную зависимость сопротивления канала от температуры. Поэтому такой подход измерения потерь значительно сужает диапазон использования генератора и не решает всей задачи в целом. Большинство индуктивных компонентов, использующихся в преобразовательной технике, рассчитаны на значительные токи в десятки и более Ампер и не поддаются такому упрощённому варианту измерения без возникновения значительной методической погрешности. Но метод измерения общего потребления показал себя хорошо при сравнительном анализе двух образцов, работающих в заданной рабочей точке.

В генераторах от фирмы Renenergy-Sys (Германия) реализована попытка оценки потерь в силовых ключах, исходя из режима их работы. Программное

## Источники потерь и методы их оптимизации

Потери по месту их возникновения		
в обмотке	в сердечнике	конструктивные
на омическом сопротивлении	гистерезисные и вихретоковые потери	— вызванные ёмкостью обмотки — вихретоковые, вызванные полем зазора
Методы оптимизации		
— применение плоских или многожильных проводников — увеличение сечения проводника — увеличение расстояния между слоями — заливка компаундом	— выбор материала и формы сердечника — увеличение сечения сердечника	— однослойная намотка — чередование слоёв — снижение ёмкости относительно корпуса — сегментирование сердечника — геометрическое удаление обмотки и зазора

обеспечение рассчитывает динамические и статические потери, основываясь на технических данных производителя и учитывая температурный режим работы. Точность такой оценки достаточно низка и не годится для задачи разделения потерь на составляющие. Обусловлено это вариациями параметров силовых ключей от заявленных производителем, их сильная температурная зависимость и ограниченность данных от производителя.

В настоящее время идёт поиск решения, которое позволило бы обеспечить приемлемую точность измерения во всём диапазоне токов, частот и напряжений. Наиболее перспективным методом исследования данной задачи представляется построение математических моделей генератора и индуктивного элемента и их совместное исследование. Данный подход позволяет минимизировать затраты времени на подготовку и постановку измерительных экспериментов и сконцентрироваться на методологии самого измерения. Разработанные математические модели уже позволили подтвердить полученные ранее результаты практических измерений и тем самым доказали перспективность данного подхода. В настоящий момент поиск решения ведётся в двух направлениях: изменение схемотехники самого генератора тока для минимизации его влияния на исследуемый индуктивный элемент и изменение схемотехники измерительных каналов для минимизации измерительной погрешности.

Успешное решение задачи точного и быстрого измерения потерь в индуктивном элементе позволит эффективно подойти к задаче его оптимизации. Для эффективной оптимизации необходимо знать преобладающую составляющую потерь, которая может быть вычислена по результатам измерений методом варьирования параметров, так как разные составляющие потерь имеют разные зависимости от частоты и амплитуды тока [12–13]:

$$P = P_R + P_{\text{скин}} + P_{\text{близ}} + P_G + P_{\text{вт}} + P_C$$

где  $P$  — общие потери индуктивного элемента;

$P_R$  — потери, вызванные сопротивлением обмотки по постоянному току;

$P_{\text{скин}}$  — потери, вызванные дополнительно вносимым сопротивлением от скин-эффекта;

$P_{\text{близ}}$  — потери, вызванные дополнительно вносимым сопротивлением от эффекта близости;

$P_G$  — потери гистерезисные в материале сердечника;

$P_{\text{вт}}$  — вихретоковые потери;

$P_C$  — потери, связанные с перезарядом ёмкости обмотки.

Для разделения потерь на составляющие необходимо провести несколько измерений с варьированием параметров. По результатам этих измерений составляется система нелинейных уравнений, решением которой и являются отдельные составляющие потерь. Время проведения измерений должно быть минимизировано, так как протекание тока через индуктивный элемент приводит к его нагреву, что значительно изменяет его характеристики. Сопротивление обмотки быстро возрастает (для меди тепловой коэффициент составляет  $+0,4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  [14]), а гистерезисные потери сердечника снижаются при нагреве. При значительном изменении характеристик в ходе проведения измерений достоверное разделение потерь на составляющие становится невозможным, так как полученная система уравнений не будет иметь решения.

В табл. 1 перечислены основные источники потерь и возможные методы их оптимизации. Данная таблица отражает накопленный опыт и может служить ориентиром при поиске оптимального решения.

**Заключение.** Оптимизация потерь в индуктивных элементах является поиском компромиссного решения по выбору оптимума из многих составляющих [12]. Это многоуровневая задача, требующая глубокого понимания взаимосвязей тех или иных изменений. Разрабатываемый метод измерения потерь нацелен на упрощение процесса оптимизации и должен упростить, но не заменить этот процесс. Основными целями оптимизации обычно являются снижение потерь и уменьшение размеров индуктивных компонентов. В некоторых случаях удаётся добиться улучшения обоих этих показателей. Примером компромиссной оптимизации может быть, например, замена массивного проводника на многожильный изолированный провод с целью снижения потерь по высокочастотной составляющей тока. При такой замене либо увеличивается сопротивление обмотки постоянному току из-за более низкой плотности заполнения многожильным проводом площади сечения катушки, либо приходится увеличивать площадь сечения катушки для сохранения сопротивления постоянному току.

Другим примером может быть желание снизить температуру катушки путём заливки компаундом. Компаунд, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, позволит распределить тепло по всему объёму и увеличить площадь охлаждения. Но вместе с этим увеличится межвитковая ёмкость и ёмкость относительно корпуса прибора, что приведёт к увеличению колебательных процессов и увеличению потерь.

Материалы, вошедшие в данную статью, подготовлены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты» о создании новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей — Уникальный номер проекта FSWF-2022-0008. Соглашение № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

Библиографический список

1. Стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников в 2020 году // IRENA. 2021. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2020\\_Summary\\_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b) (дата обращения: 27.02.2024).
2. Россихин Д. А., Менделеев Д. И., Галимзянов Л. А. Вопросы применения и развития систем накопления электроэнергии // Развивая энергетическую повестку будущего: сб. тр. конф. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 24-29. EDN: UYMWGF.
3. Коростелин А. В. Импульсные источники питания. Элементная база, архитектура и ремонт. Москва: СОЛОН-Пресс, 2020. С. 118 – 216. ISBN 978-5-91359-412-9.
4. Кочемасов В., Хорев С. Современные индуктивные радиокомпоненты. Часть 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 2 (213). С. 142 – 152. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.142.152. EDN: BPJTVI.
5. Yurkov A. S. To the theoretical description of the losses in inductance coils // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 4 (39). С. 19 – 29. EDN: YWYYGL.
6. LCR-Измеритель R&SLCX. Спецификация. Версия 2.02 // Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Июль 2023. С. 1 – 24. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_brochures\\_and\\_datasheets/data\\_sheet/3609\\_8309\\_38/LCX\\_dat\\_ru\\_3609-8309-38\\_v0202.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/data_sheet/3609_8309_38/LCX_dat_ru_3609-8309-38_v0202.pdf) (дата обращения: 04.03.2024).
7. LCR Measurement Primer. Precision instruments for test and measurement // IET Labs Inc. 2018. № 1. P. 2 – 78. URL: [https://www.ietlabs.com/pdf/application\\_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf](https://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf) (дата обращения: 14.02.2024).
8. DC Bias Current Sources. 3265B Technical Data Sheet // Wayne Kerr Electronics. P. 1 – 2. URL: <http://www.waynekerrtest.com/datasheet/instruments/wk3265b.pdf> (дата обращения: 14.02.2024).
9. Уилсон Л. Внутрисхемное измерение параметров дросселей и трансформаторов в импульсных источниках питания // ООО «Альфа Инструментс». URL: [https://alfa-inst.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe\\_izmerenie\\_parametrov\\_drosseley\\_i\\_tr/](https://alfa-inst.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe_izmerenie_parametrov_drosseley_i_tr/) (дата обращения: 14.02.2024).
10. Voigt G., Dobrenko A., Kirjuchin A., Komarov E. Optimierte Drosselspulen für die moderne Leistungselektronik // FHK Forum. 2004 – 2005. P. 56 – 59.
11. Касаткин А. С., Немцов М. В. Курс электротехники. 8-е изд., стер. Москва: Высшая школа, 2005. 542 с. ISBN 5-06-005276-1.
12. Albach M. Induktive Komponenten in der Leistungselektronik // Bauelemente der Leistungselektronik. VDE Verlag GmbH. Aprl. 13 – 14, 2011. Berlin. S. 77 – 86.
13. Ferrite Summary // TDK. 2021. P. 3 – 8. URL: [https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite\\_summary\\_en.pdf](https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite_summary_en.pdf) (дата обращения: 14.02.2024).
14. Алиев И. И. Электротехнический справочник. 5-е изд., стер. Москва: РадиоСофт, 2010. 383 с. ISBN 978-5-93037-213-7.

**ВОЛКОВ Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 SPIN-код: 3022-2171  
 AuthorID (РИНЦ): 726099  
 ORCID: 0000-0002-0011-1056  
 AuthorID (SCOPUS): 56900509700  
 ResearcherID: A-6919-2014  
 Адрес для переписки: VolkovAV@mpei.ru

**ДОБРЕНКО Алексей Михайлович**, инженер-исследователь лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 Адрес для переписки: DobrenkoAM@mpei.ru

**ДРОБНИЦКИЙ Никита Андреевич**, магистр, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 SPIN-код: 5290-2197  
 AuthorID (РИНЦ): 1176333  
 ORCID: 0009-0006-4484-9745  
 Адрес для переписки: DrobniiskyNA@mpei.ru

**ДРУЖИНИН Алексей Анатольевич**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 SPIN-код: 8488-6471  
 AuthorID (РИНЦ): 843020  
 ORCID: 0000-0001-9198-9253  
 AuthorID (SCOPUS): 57192078235  
 Адрес для переписки: DruzhininAA@mpei.ru

**МЫЛКИН Дмитрий Васильевич**, аспирант, ассистент кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 SPIN-код: 8304-9535  
 AuthorID (РИНЦ): 1176114  
 Адрес для переписки: MylkinDV@mpei.ru

**ШЕЙКИН Максим Олегович**, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.  
 SPIN-код: 6282-3730  
 AuthorID (РИНЦ): 1179616  
 ORCID: 0000-0002-6859-586X  
 Адрес для переписки: SheykinMO@mpei.ru

Для цитирования

Волков А. В., Добренко А. М., Дробницкий Н. А., Дружинин А. А., Мылкин Д. В., Шейкин М. О. Измерение и оптимизация индуктивных элементов в системах управления комбинированными энергокомплексами на основе возобновляемых источников энергии // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 117 – 124. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-117-124.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г.  
 © А. В. Волков, А. М. Добренко, Н. А. Дробницкий, А. А. Дружинин, Д. В. Мылкин, М. О. Шейкин

# MEASUREMENT AND OPTIMIZATION OF INDUCTIVE ELEMENTS IN CONTROL SYSTEMS OF COMBINED HEAT AND POWER SUPPLY BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article deals with the role of inverter technology in the future development of renewable energies, existing methods for measuring the loss power of inductive elements and their further development, which are used in pulse or resonance inverters for heating and energy supply based on renewable energies. The research presents an overview of the existing methods and their applicability for measuring the power loss of inductive elements. A new approach is proposed for the preliminary estimation of the power loss of inductive elements based on measurements that approximate real operating conditions. The actual state of the technology in this field is described and the functional concept of test current generators is presented. The difficulties in separating the power loss into individual components are considered and the characteristics of the measurement method for solving this problem are addressed. In addition, the physical causes of the individual components of power losses in inductive elements are discussed and recommendations for minimizing are demonstrated.

**Keywords:** power loss measurement, inductive elements, test current generator, power loss separation, inductive element optimisation, inverter technology, renewable energy sources, micro hydroelectric power plants.

## Acknowledgments

The work is carried out by the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the National Project «Science and Universities» on the creation of new laboratories under the leadership of young promising researchers. Legal project number FSWF-2022-0008. Agreement No. 075-03-2022-138/5 from 02.11.2022.

## References

1. Stoimost' proizvodstva elektroenergii iz vobnovlyayemykh istochnikov v 2020 godu [Renewable power generation costs in 2020] // IRENA. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2020\\_Summary\\_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b) (accessed: 27.02.2024). (In Russ.).
2. Rossikhin D. A., Mendeleyev D. I., Galimzyanov L. A. Voprosy primeneniya i razvitiya sistem nakopleniya elektroenergii

[Issues of application and development of energy storage systems] // Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego. *Developing the Energy Agenda of the Future*. Saint Petersburg, 2021. P. 24–29. EDN: UYMWGF. (In Russ.).

3. Korostelin A. V. Impul'snyye istochniki pitaniya. Elementnaya baza, arkhitektura i remont [Pulse power supplies. Element base, architecture and repair]. Moscow, 2020. P. 118–216. ISBN 978-5-91359-412-9. (In Russ.).

4. Kochemasov V., Khorev S. Sovremennyye induktivnyye radiokomponenty. Chast' 1 [Modern inductive radio components. Part 1] // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2022. No. 2 (213). P. 142–152. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.142.152. EDN: BPJTVI. (In Russ.).

5. Yurkov A. S. To the theoretical description of the losses in inductance coils // Tekhnika radiosvyazi. *Radio Communication Technology*. 2018. Issue 4 (39). P. 19–29. EDN: YWYGYL. (In Engl.).

6. LCR-Izmeritel' R&S LCX. Spetsifikatsiya. Versiya 2.02 [R&S LCX LCR Meter. Specification. Version 2.02] // Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. July 2023. P. 1–24. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_brochures\\_and\\_](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_)

datasheets/data\_sheet/3609\_8309\_38/LCX\_dat\_ru\_3609-8309-38\_v0202.pdf (accessed: 04.03.2024). (In Russ.).

7. LCR Measurement Primer. Precision instruments for test and measurement // IET Labs Inc. 2018. No. 1. P. 2–78. URL: [https://www.ietlabs.com/pdf/application\\_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf](https://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf) (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

8. DC Bias Current Sources. 3265B Technical Data Sheet // Wayne Kerr Electronics. P. 1–2. URL: <http://www.waynekerrtest.com/datasheet/instruments/wk3265b.pdf> (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

9. Wilson L. Vnutriskhemnoe izmerenie parametrov drossley i transformatorov v impul'snykh istochnikakh pitaniya [In-circuit measurement of inductors and transformers in switching power supplies] // ООО «Альфа Инструменты». LTD «Alfa Instruments». URL: [https://alfa-instr.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe\\_izmerenie\\_parametrov\\_drossley\\_i\\_tr/](https://alfa-instr.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe_izmerenie_parametrov_drossley_i_tr/) (accessed: 14.02.2024). (In Russ.).

10. Voigt G., Dobrenko A., Kirjuchin A., Komarov E. Optimierte Drosselspulen für die moderne Leistungselektronik // FHK Forum. 2004–2005. P. 56–59 (In Germ.).

11. Kasatkin A. S., Nemtsov M. V. Kurs elektrotehniki [Book of electrical engineering]. 8th ed., ster. Moscow, 2005. 542 p. ISBN 5-06-005276-1. (In Russ.).

12. Albach M. Induktive Komponenten in der Leistungselektronik [Inductive components in power electronics] // Bauelemente der Leistungselektronik. *Components in Power Electronics*. VDE Verlag GmbH. Aprl. 13–14, 2011. Berlin. P. 77–86. (In Germ.).

13. Ferrite Summary // TDK. 2021. P. 3–8. URL: [https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite\\_summary\\_en.pdf](https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite_summary_en.pdf) (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

14. Aliyev I. I. Elektrotehnicheskii spravochnik [Electrical Engineering Handbook]. 5th ed., ster. Moscow, 2010. 383 p. ISBN 978-5-93037-213-7. (In Russ.).

**VOLKOV Aleksandr Viktorovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Hydromechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 3022-2171

AuthorID (RSCI): 726099

ORCID: 0000-0002-0011-1056

AuthorID (SCOPUS): 56900509700

ResearcherID: A-6919-2014

Correspondence address: [VolkovAV@mpei.ru](mailto:VolkovAV@mpei.ru)

**DOBRENKO Aleksey Mikhaylovich**, Research Engineer of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

Correspondence address: [DobrenkoAM@mpei.ru](mailto:DobrenkoAM@mpei.ru)

**DROBNITSKIY Nikita Andreyevich**, Master's Degree, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 5290-2197

AuthorID (RSCI): 1176333

ORCID: 0009-0006-4484-9745

Correspondence address: [DrobnitskyNA@mpei.ru](mailto:DrobnitskyNA@mpei.ru)

**DRUZHININ Aleksey Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Head of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 8488-6471

AuthorID (RSCI): 843020

ORCID: 0000-0001-9198-9253

AuthorID (SCOPUS): 57192078235

Correspondence address: [DruzhininAA@mpei.ru](mailto:DruzhininAA@mpei.ru)

**MYLKIN Dmitriy Vasilyevich**, Graduate Student, Assistant of Hydromechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 8304-9535

AuthorID (RSCI): 1176114

Correspondence address: [MylkinDV@mpei.ru](mailto:MylkinDV@mpei.ru)

**SHEYKIN Maksim Olegovich**, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 6282-3730

AuthorID (RSCI): 1179616

ORCID: 0000-0002-6859-586X

Correspondence address: [SheykinMO@mpei.ru](mailto:SheykinMO@mpei.ru)

#### For citations

Volkov A. V., Dobrenko A. M., Drobnitskiy N. A., Druzhinin A. A., Mylkin D. V., Sheykin M. O. Measurement and optimization of inductive elements in control systems of combined heat and power supply based on renewable energy sources // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-117-124.

Received March 27, 2024.

© A. V. Volkov, A. M. Dobrenko, N. A. Drobnitskiy,

A. A. Druzhinin, D. V. Mylkin, M. O. Sheykin