

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА МОДЕЛИ ПРОВОДА ЛЭП

В.С. Ратушняк¹, В.С. Ратушняк²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия,

² Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Россия

В статье описана структура устройства для предотвращения образования льда на проводах ЛЭП ударным импульсным способом при боковом типе крепления. Исполнительным механизмом устройства является магнитно-импульсный электромеханический преобразователь энергии. Он способен обеспечить соответствие параметров удара расчетным значениям в широком диапазоне времен и сил. Это преимущество определило выбор в пользу данного типа исполнительных устройств. Описаны основные функции устройства. На основании этого выделены функциональные блоки и дано их описание. Приведено влияние различных конструктивных параметров деталей устройства на его работоспособность. Сформулированы требования к элементам конструкции. В результате сделан обоснованный выбор при конструировании устройства. Разработана лабораторная установка для предотвращения образования льда на модели провода ЛЭП в уменьшенном масштабе. Описана система измерения колебаний в нескольких точках провода. Приведены результаты экспериментального исследования колебаний провода. Показано соответствие расчетных и экспериментальных значений отклонения провода, что косвенно подтверждает соответствие параметров разработанного устройства расчетным значениям.

Ключевые слова: обледенение ЛЭП, предупреждение гололедообразования, магнитно-импульсный двигатель, электромеханический преобразователь, индуктор.

Введение

Гололедообразование на проводах ЛЭП в осенне-весенний период может нарушить нормальную работу электрической сети вплоть до вывода из строя ее участков [1]. Проблему обледенения авторы статьи предлагают решать путем введения активного метода предупреждения гололедообразования при помощи своевременного удаления воды с поверхности провода. Удаление капель воды основано на возбуждении бегущей волны с небольшой амплитудой относительно диаметра провода и, как следствие, знакопеременных ускорений большой величины, то есть усилий между проводом и водной массой, осевшей на нем. Предложена конструкция устройства и принцип его действия, способные обеспечить генерацию и передачу расчетной нагрузки [2–4].

Работа устройства основана на явлении отталкивания двух проводников под воздействием силы Ампера, возникающей при разряде накопителя энергии на индукторную систему:

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2 l}{r}, \quad (1)$$

где I_1 – ток, протекающий в индукторе; I_2 – ток, наведенный в проводящей пластине (бойке); l – длина провода спирали индуктора; r – расстояние между индуктором и бойком. Такую систему можно назвать индуктивным или магнитно-импульсным электромеханическим преобразовате-

лем (ЭП) энергии. В состав магнитно-импульсных ЭП энергии обычно входят: накопитель энергии (индуктивный или емкостной – импульсный конденсатор), коммутирующее устройство и индукторная система (ИС) – индуктор и боек. Индуктор может представлять собой плоскую катушку, а боек – диск из электропроводного материала (рис. 1). Когда по индуктору протекает импульс тока, возникает переменный по величине магнитный поток, который сцепляется с бойком – короткозамкнутым контуром, гальванически не связанным с индуктором. В результате наведенная ЭДС создает в бойке ток, направленный навстречу току в индукторе. Между контурами, по которым протекают токи в противоположных направлениях, возникает сила Ампера, стремящаяся отбросить их друг от друга. При этом величина силы Ампера определяется скоростью нарастания тока в индукторе.

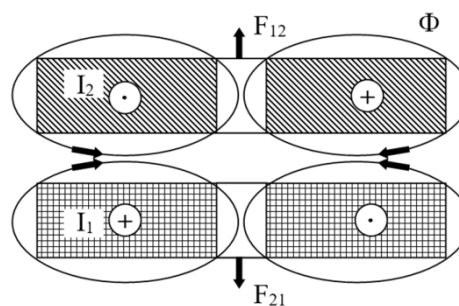


Рис. 1. Схема магнитно-импульсного ЭП энергии

В литературе широко представлены исследования свойств линейных магнитно-импульсных двигателей (МИД), реализующих описанный принцип. Встречаются и другие названия таких двигателей: например, электромагнитный, индукционно-динамический, электроимпульсный. МИД находят свое применение при решении многих задач: для разгона тел до высоких скоростей [5], обработки металлов давлением [6], разрушения сводов и очистки оборудования [7, 8], в том числе ото льда [9].

Постановка задачи

Технологическая операция, которую должно выполнять устройство, заключается в удалении капель воды по всей длине пролета путем создания в горизонтальной плоскости бегущей изгибающей волны от центра пролета к его окончаниям. Удаление капель происходит при первом проходе бегущей волны от устройства, при этом пока волна не достигла концов пролета, они находятся в покое. Исполнительный механизм, основанный на принципе магнитно-импульсного ЭП энергии, способен обеспечить требуемое соответствие расчетным значениям. Необходимые сила и время удара могут находиться в диапазоне сотен микросекунд и сотен тысяч ньютонов. Исполнительный механизм способен реализовывать требуемые параметры воздействия в зависимости от выбранных на этапе проектирования конструктивных и электрических параметров устройства.

Снижению износа деталей линейной арматуры, изоляторов и проводов от действия устройства способствует генерация такой бегущей волны, что при минимально необходимой амплитуде происходит удаление капель воды по всей длине пролета в радиусе, незначительно меньшем половины длины пролета. Гашение бегущей волны происходит естественным образом за счет диссипативных сил, а также за счет гасителей вибрации, располо-

женных на концах пролета. Важной особенностью предлагаемого устройства является его автономность [4].

Целью данной статьи является разработка лабораторной установки для предупреждения образования льда на модели провода ЛЭП по заданным параметрам удара и исполнительного механизма, а также сравнение экспериментальных и численных значений реакции модельного провода на воздействие лабораторной установки.

Теоретическая часть

Устройство для предупреждения образования наледи на проводах ЛЭП при боковом способе крепления размещается исполнительной частью между фазными проводами (рис. 2а) двухцепной ЛЭП любого класса напряжения. Наиболее оправдано применение такого устройства на ЛЭП 110–330 кВ как альтернатива тепловому методу [10], где не могут быть применены пассивные средства борьбы с обледенением, например, самоизолированные несущие провода. Радиус действия такого устройства ограничен длиной пролета [4], в связи с чем оно должно размещаться на каждой паре проводов в каждом пролете. В корпусе устройства располагаются индуктор и боек, а также блоки питания, управления, накопления заряда и зарядное устройство. Боек в исходном состоянии плотно прижат к индуктору при помощи возвратного механизма. Кроме перечисленных функциональных блоков в состав устройства входят штанги, крепежные элементы, защитный гофрированный кожух. Соединение бойка с проводом выполняется при помощи штанги из изоляционного материала, закрепленной одним концом в корпусе бойка, другим концом – на проводе. Индуктор соединен со вторым проводом аналогично. Все эти детали в совокупности составляют общую массу устройства.

По причине того, что в данной статье мы рассматриваем разработку лабораторной установки

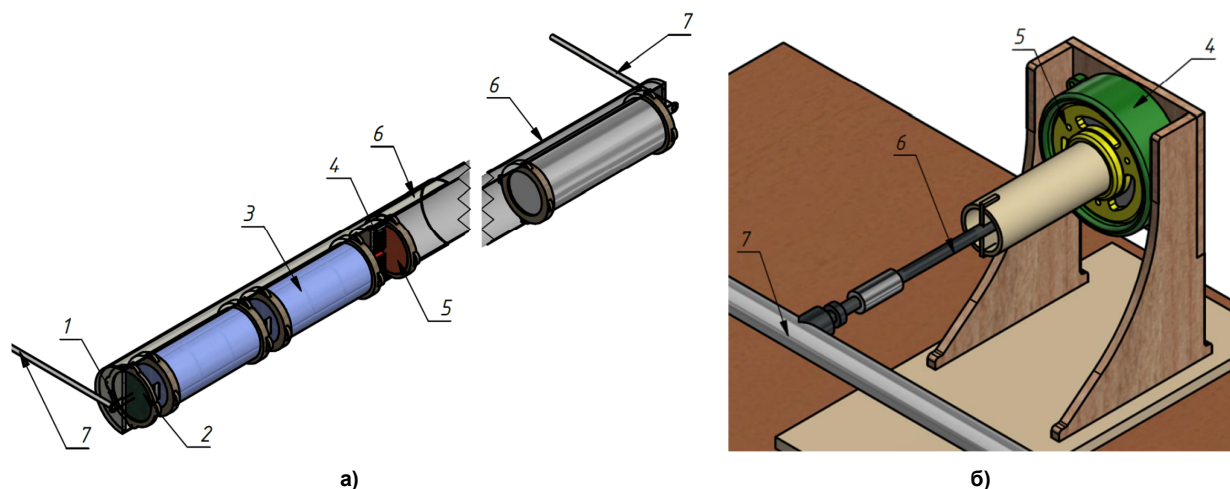


Рис. 2: а – конструктивная схема устройства для ЛЭП; б – конструктивная схема устройства для модели ЛЭП. 1 – блок питания, 2 – блок управления, 3 – зарядное устройство, 4 – индуктор в корпусе, 5 – боек в корпусе, 6 – штанга, 7 – провод

для модели ЛЭП в уменьшенном масштабе, масса устройства должна быть уменьшена пропорционально. Однако устройство нельзя масштабировать до размеров, когда его вес будет значительно меньше веса модельного пролета без ущерба для параметров удара. В связи с этим принято решение о закреплении устройства на земле, что минимизирует весовую нагрузку на провод. Конструктивная схема устройства в такой реализации представлена на рис. 2б. В отличие от полномасштабного варианта, индуктор в корпусе зафиксирован на неподвижной платформе. Также на эту же платформу вынесены все функциональные блоки устройства. Бок лабораторной установки соединен с проводом. Такое изменение конструкции, в отличие от полномасштабного устройства, не меняет характер воздействия на провод, поскольку сила удара зависит только от физических свойств ИС. Под воздействием этой силы бок с прикрепленным проводом отталкивается от неподвижного индуктора так же, как если бы он отталкивался от подвижного индуктора, закрепленного на второй провод пары.

Функциональная схема установки включает: зарядное устройство, блок накопления заряда, блок питания, блок управления, индукторную систему (рис. 3). Зарядное устройство (ЗУ) подключается к сети 220 В и предназначено для питания блока накопления заряда (БНЗ) выпрямленным пульсирующим током по сигналу с блока управле-

ния (БУ). Функцию преобразования переменного напряжения в выпрямленное пульсирующее напряжение, необходимое для питания БНЗ, выполняет выпрямитель, состоящий из диодной сборки (на схеме VD1–VD4).

Возбуждение индуктора происходит при помощи емкостного накопителя энергии (на схеме C1, C2), входящего в состав блока накопления заряда (БНЗ). Накопление заряда осуществляется до заданного уровня с блока управления (БУ). Функцию измерения текущего уровня заряда выполняет высоковольтный делитель (ВВД) (на схеме R1–Rn). Также в состав БНЗ входит коммутирующее устройство – силовой электронный ключ (на схеме VS1), который по команде с БУ (сигнал «запуск разряда») обеспечивает замыкание цепи для разряда накопителя энергии на индуктор, при этом снабберная RC-цепь (на схеме Rs1, Cs1) исключает осцилляции тока после рабочего импульса.

Индукторная система (ИС) предназначена для генерации импульсного магнитного поля и преобразования его в механический импульс. ИС представляет собой индуктор и бок (на схеме И).

Работу всего устройства контролирует блок управления (БУ). Его основная функция – управление процессом заряда БНЗ и его разряда на ИС. При помощи регулятора величины заряда (на схеме R3) оператор задает количество энергии, запасаемой установкой. Также оператор выполняет запуск процесса накопления заряда с дальнейшим

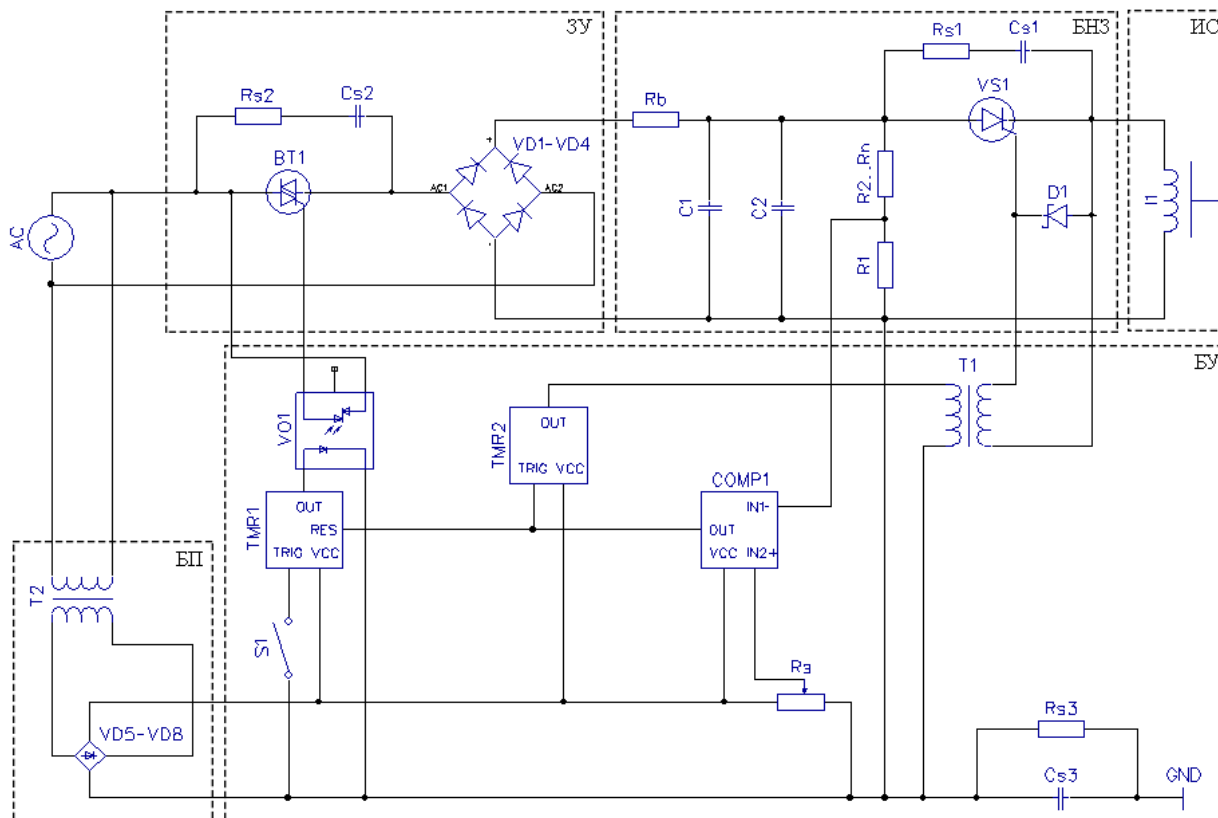


Рис. 3. Функциональная схема лабораторной установки

разрядом путем нажатия кнопки «пуск» (на схеме S1). При этом пускорегулирующее устройство (ПРУ) (на схеме TMR1, COMP1, TMR2) подает сигнал «запуск заряда» с БУ на ЗУ посредством силового электронного ключа (на схеме VT1) и оптофона (на схеме VO1). В момент, когда напряжение (и как следствие – энергия) накопителя в процессе заряда достигает заданного на R3 значения, ПРУ подает сигнал «останов заряда» с БУ на ЗУ (также посредством VT1 и VO1), за счет чего происходит отключение БНЗ от источника питания. По остановке заряда ПРУ подает сигнал «запуск разряда» на силовой электронный ключ БНЗ. Функцию согласования сигнала «запуск разряда», а также гальванической развязки с силовой линией выполняет трансформатор (на схеме T1). Для подавления индуктивных выбросов, предотвращения ошибочного включения ключа VT1, которое может произойти в результате сетевых помех и понижения значений перенапряжений в переходных процессах, которые появляются при коммутационных действиях с ключом, предусмотрена снабберная RC-цепь (на схеме Rs2, Cs2). Питание БУ осуществляется от блока питания (БП) 12 В, подключенного к сети 220 В. Особенности ЗУ не позволяют подключить общий «–» к «земле», поэтому требуется гальваническая развязка (на схеме Rs3, Cs3).

Требования к устройству

На основе функциональной схемы устройства разрабатывается принципиальная схема, принимаются конструктивные решения. Центральным узлом устройства, которое определяет все остальные решения, является ИС. Помимо выбора электромагнитных и геометрических параметров широкие возможности открывает подход по выбору конфигурации индуктора и бойка. Возможны различные формы ИС: цилиндрические индукторы – соленоиды (одновитковые, многослойные спиральные), плоские спиральные индукторы-катушки или индукторы-прямоугольники (одновитковые, многослойные плоские/квадратного/прямоугольного/круглого сечения, одно-/многослойные). Бойки могут быть притягивающимися (имеется только дисковая часть), втягивающимися (имеется только аксиальная часть) и комбинированными [11, 12]. Известны экспериментальные и теоретические исследования, касающиеся сравнения эффективности различных конструкций ИС [13–15], в том числе с электромагнитным или ферромагнитным экраном [16]. Однако следует отметить, что авторы принимают различные критерии эффективности, которые значительно зависят от технологической задачи, для которой предназначено устройство. Это связано с тем, что параметры выполняемой операции многофакторны и чувствительны к условиям функционирования. В связи с этим должны быть определены показатели эффек-

тивности для предложенного в статье исполнительного устройства и проанализированы в этой реализации возможные варианты конструкции. Представленные в литературе методы расчета ИС [17, 18], а также предыдущий опыт могут быть полезны для этой цели.

Изолированная электропроводная шина рабочей обмотки индуктора многократного использования должна быть выполнена из материалов с высокой удельной величиной растягивающего напряжения и достаточно высокой электропроводностью – например, из меди, латуни, бронзы. Изолирующий корпус индуктора должен быть прочным и легким, выполненным, например, из текстолита, дельтадревесины, фторопласта. С целью изоляции индуктора и дополнительного повышения его механической прочности конструкция заливается компаундом. Толщина слоя изоляции между витками индуктора и бойком не должна превышать 0,5–1,5 мм, так как с увеличением толщины изоляции увеличивается рассеивание магнитного потока. Изоляционными материалами, применяемыми в индукторах, служат лавсановые, фторопластовые и полиамидные пленки, слюда, стеклотекстолит, стекловолокно, пропитанное эпоксидными смолами.

Боек рекомендуется выполнять из материалов с высокой удельной электропроводностью, например, из серебра, золота, меди, магния, алюминия. Внешний и внутренний диаметры бойка и индуктора должны быть равны. В противном случае радиальная составляющая магнитного поля приводит к деформации бойка вплоть до его разрыва [19]. Расположение отверстий в бойке и их количество влияют на величину импульса силы Ампера ($H \cdot c$) [20]. В наибольшей степени снижение импульса силы Ампера наблюдается при расположении отверстий вблизи половины внешнего диаметра бойка (при внутреннем диаметре равном 0,1 от внешнего). Если отверстия расположены вблизи наружного диаметра бойка, то происходит даже некоторое повышение импульса силы Ампера, что можно пояснить выталкиванием индуцированного тока в среднюю часть якоря. Увеличение количества отверстий (от 0 до 4) влияют на величину импульса силы Ампера незначительно (в пределах 1 %).

Перемещение бойка при прямом ходе осуществляется под действием силы Ампера со стороны индуктора, при обратном ходе – под действием возвратного механизма. В качестве такого механизма могут использоваться различные конструктивные решения: например, возвратная пружина или предложенный в [21] ферромагнитный стержень с наконечником.

Емкостный накопитель – наиболее дорогой узел установки. Рекомендуется отдать предпочтение высоковольтным импульсным пусковым конденсаторам в связи с особенностями разряда кон-

денсатора на ИС, такими как большая амплитуда импульса разрядного тока и высокая скорость нарастания мгновенного значения тока (быстрый вклад энергии, запасенной в конденсаторе, в нагрузку), требования к уровню заряда при минимальной собственной индуктивности и активном сопротивлении. Следует отдавать предпочтение конденсаторам с минимальной массой и габаритами.

Схема и конструкция электронного ключа для запуска разряда индуктора должна обеспечивать минимальные собственную индуктивность и активное сопротивление, высокую работоспособность и способность коммутировать высокие токи при высокой частоте разрядного контура. В качестве коммутирующего устройства может использоваться тиристор.

Электронный ключ для запуска заряда может управляться оптоотроном. Он обеспечивает отключение БНЗ от ЗУ в момент перехода сетевого напряжения через ноль, что минимизирует уровень создаваемых устройством помех. Кроме этого, его задачей является обеспечение гальванической развязки низковольтной управляющей части схемы и силового электронного ключа ВТ1.

ПРУ может быть реализован в виде микроконтроллера с программным управлением (микроЭВМ) либо посредством элементной базы. Второй вариант является более надежным в условиях магнитных помех, возникающих при работе устройства, однако более трудоемким при проектировании и менее универсальным.

Минимизация паразитной индуктивности и сопротивления является важной задачей, потому что это способствует более полному переходу энергии конденсаторной батареи в энергию импульсного магнитного поля. Наибольший вклад в паразитную индуктивность и сопротивление вносят провода, по которым проходит импульс тока, содержащий высокочастотные гармоники. Поскольку паразитная индуктивность прямо пропорциональна длине и обратно пропорциональна ширине проводов [22], в колебательном контуре важно использовать как можно более короткие провода большого сечения, а также малоиндуктивные выводы для подключения ИС.

Экспериментальные исследования

С целью проведения экспериментальных исследований реакции провода на воздействия, оказываемые устройством, построена модель пролета ЛЭП и разработано устройство для предупреждения гололедообразования. Параметры модельного пролета выбраны с учетом условий подобия [23]. Для всех размеров и параметров модельного пролета ЛЭП R_i'' и реального пролета ЛЭП R_i' составлены уравнения изменения масштаба:

$$\frac{R_i'}{R_i''} = n^{P_{R_i}}, \quad (2)$$

где P_{R_i} – коэффициент изменения масштаба, представленный в виде степенной функции; n – кратность. В табл. 1 представлены параметры реального и модельного пролетов, а также соответствующие коэффициенты изменения масштаба при кратности, равной 850. Реальный пролет соответствует марке АС120/19, для модельного пролета выбран стальной витой тросик, дающий удовлетворительное согласие со значениями расчетного масштабирования.

Затем построена численная модель пролета ЛЭП в уменьшенном масштабе и определены оптимальные параметры воздействия, рассчитаны параметры устройства предотвращения образования льда для модели ЛЭП (табл. 2).

Выбрана конфигурация ИС простого конструктивного исполнения: индуктор в форме дисковой катушки прямоугольного сечения и плоский боек. Рабочая обмотка индуктора изготовлена из изолированной медной шины прямоугольного сечения, что способствует созданию более равномерного магнитного поля. Спираль индуктора $3,6 \times 1,2$ мм уложена в корпус из ABS пластика и залита компаундом, высота изоляции составляет 1,3 мм. Боек экспериментальной установки изготовлен из алюминия, диаметры бойка соответствуют диаметрам индуктора, высота бойка 3,5 мм, боек закреплен в пластиковом корпусе при помощи болтов через 3 отверстия вблизи наружного диаметра.

Для обеспечения рассчитанных значений емкости и напряжения заряда выбран вариант парал-

Таблица 1

Параметры реального и модельного пролета

Параметр	Реальный пролет	Модельный пролет (расчет)	Модельный пролет (практика)	Коэффициент
Длина пролета, м	65	6,86	7	1/3
Площадь поперечного сечения провода, мм ²	136,43	1,52	1,52	2/3
Диаметр провода, мм	15,2	1,60	1,39	1/3
Плотность, кг/м	0,471	0,016	0,012	0,502
Стрела провеса, мм	134,85	14,24	14,33	1/3
Тяжение, Н	18077	65	49	5/6
Модуль Юнга, ГПа	82,5	26,5	189,9	0,168

Таблица 2

Параметры устройства

Параметр	Значение
Внешний диаметр индуктора и бойка, м	0,055
Внутренний диаметр индуктора и бойка, м	0,02
Толщина изоляции спирали индуктора, м	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Толщина провода спирали индуктора, м	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Емкость накопительного конденсатора, Ф	$900 \cdot 10^{-6}$
Напряжение, до которого заряжается конденсатор, В	230
Сила удара, Н	$1 \cdot 10^3$
Время удара, с	$250 \cdot 10^{-6}$
Отклонение бойка, м	$14 \cdot 10^{-3}$
Сила инерции капли на конце пролета, Н	$0,505 \cdot 10^{-3}$

лельного подключения двух импульсных пусковых конденсаторов CD60 емкостью 450 мкФ. Время заряда конденсаторной батареи до требуемого напряжения (230 В) составляет 6 с. В качестве электронного ключа для запуска разряда используется тиристор быстродействующий ТБ242-63-14, способный коммутировать цепи с высоким напряжением (до 1,4 кВ) и током (до 63 А).

Поскольку установка получает питание от сети 220 В, в блоке ЗУ установлен однофазный диодный мост, преобразующий переменное напряжение в выпрямленное пульсирующее напряжение 300 В 4 А. В качестве силового ключа для запуска заряда используется симистор ВТА06-600С. ПРУ реализовано посредством элементной базы: двух таймеров NE555P и компаратора LM311. Таймер 1 выполняет функцию управления состоянием электронного ключа ЗУ. Команду о включении он получает при коммутации кнопки «Пуск», об отключении – по сигналу от компаратора или при превышении времени ожидания (1 с). Компаратор

контролирует уровень заряда, накопленного в БНЗ, путем сравнения его с требуемым уровнем заряда, а также подает сигнал на отключение ЗУ от БНЗ, а затем на разряд БНЗ на ИС. Таймер 2 выполняет функцию задержки сигнала «запуск разряда» с целью ожидания гарантированного отключения ЗУ от БНЗ. Время задержки составляет больше полупериода колебаний переменного напряжения источника питания. Общий вид устройства приведен на рис. 4.

Для измерения колебаний провода под воздействием ударов устройства была создана оптическая измерительная система. Это решение обосновано помехозащищенностью оптического датчика в отличие от электромагнитного и более высокой точностью измерений в отличие от тензометрического датчика, поскольку перемещения провода составляют десятки миллиметров.

В состав измерительной системы входят два прибора с оптическими датчиками. Функциональная схема приборов приведена на рис. 5а. Источ-

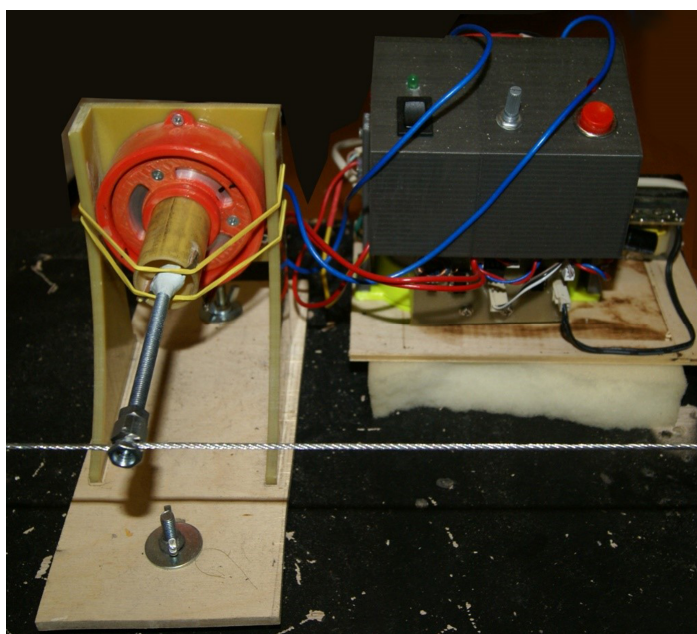


Рис. 4. Общий вид лабораторной установки

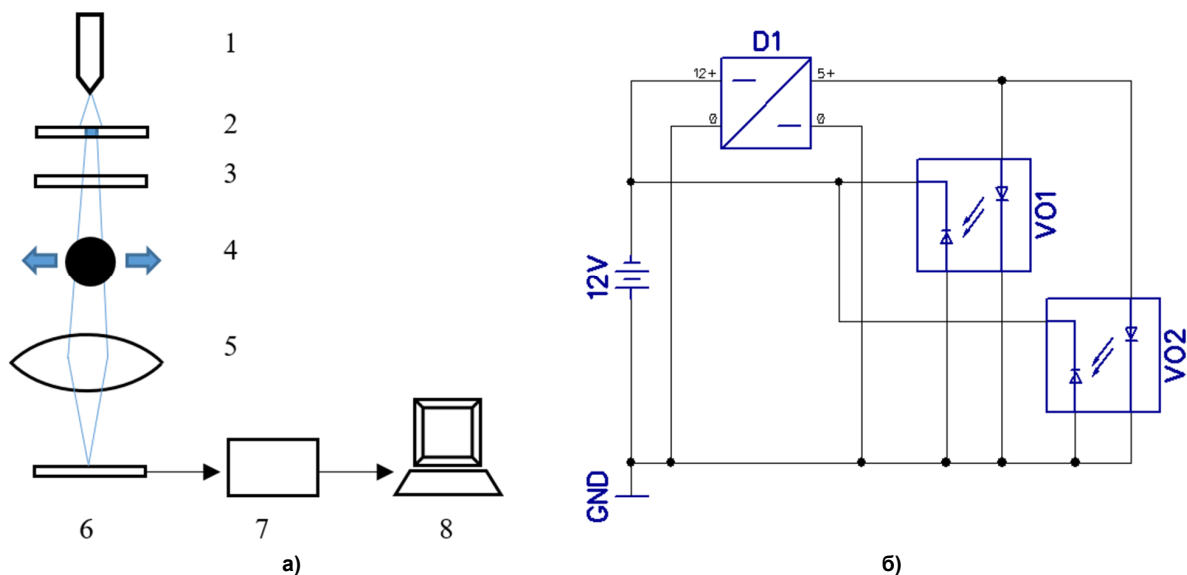


Рис. 5: а – функциональная схема прибора с оптическим датчиком: 1 – лазер, 2 – экран с прямоугольным отверстием, 3 – поляризатор, 4 – объект измерения (стрелками указано направление движения), 5 – собирающая линза, 6 – фотоприемник, 7 – АЦП (осциллограф), 8 – ПК; б – принципиальная схема измерительной системы

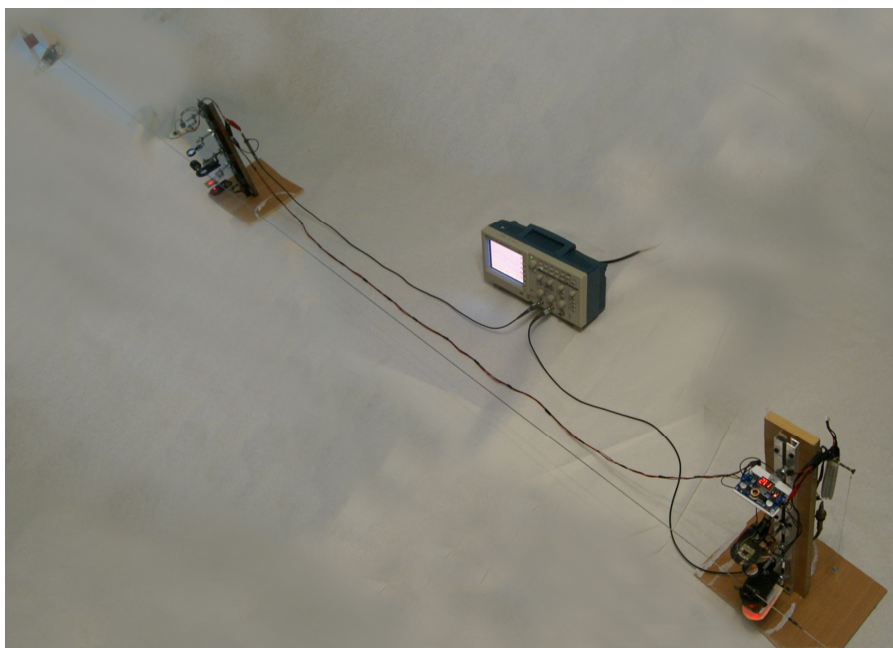


Рис. 6. Общий вид модели пролета ЛЭП и измерительной системы

ником освещения является лазерный луч, приемником – фотодиод ВРW34 со временем нарастания 100 нс. Перемещение определяется по смещению объекта измерения – шторки, закрепленной на проводе, за счет чего меняется освещенность фотодиода. Благодаря тому, что оба прибора получают питание от химического источника, а для питания лазеров используется DC/DC преобразователь (рис. 5б), выступающий дополнительным стабилизатором напряжения, обеспечивается высокая точность полученных сигналов.

В качестве регулятора интенсивности светового потока используется поляризатор, за счет че-

го при измерениях задействуется область только линейной зависимости обратного тока фотодиода от светового потока. Фотодиод включен в схему с операционным усилителем LM358, откуда происходит регистрация сигнала цифровым двухканальным осциллографом с памятью. Дискретизация АЦП по времени составляет 5 нс, дискретизация по уровню – 1 мкВ. Таким образом, обеспечивается точность измерения перемещения около 1,5 мкм.

Общий вид модели пролета ЛЭП и измерительной системы приведены на рис. 6.

Проведено 10 экспериментов и получены осредненные значения колебаний двух точек пролета

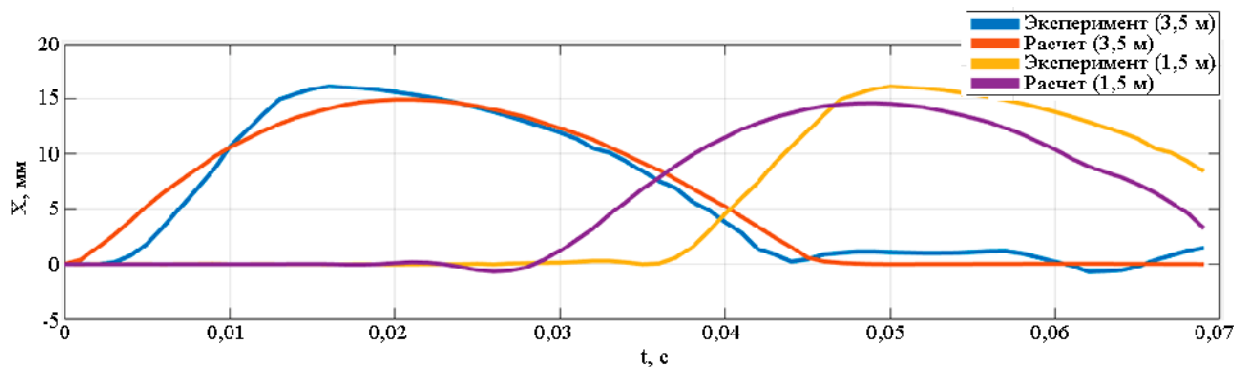


Рис. 7. Графики колебания провода в точках 3,5 и 1,5 м

(в центре пролета и на расстоянии 2 м от центра). Данные значения приведены в сравнение с расчетными, полученными в численной модели провода ЛЭП и устройства. Расчетные и экспериментальные данные об амплитуде колебаний провода и скорости распространения бегущей волны (рис. 7) находятся в хорошем согласии. Это говорит о соответствии параметров разработанного устройства расчетным значениям.

Заключение

Разработана лабораторная установка для предупреждения образования льда на проводах ЛЭП. Исполнительное устройство установки работает на принципе магнитно-импульсного ЭП энергии, что обеспечивает передачу на провод расчетного воздействия. Даны отличия лабораторной установки от устройства в реальном масштабе. Эти отличия касаются способа питания, места размещения деталей конструкции, требований к всепогодности исполнения. Все это влияет на массогабаритные

показатели устройства, однако принцип его работы и функциональные блоки остаются неизменными. Таким образом, лабораторная установка как эффективное средство экспериментального исследования свойств конструкции позволила подтвердить ее работоспособность и адекватность разработанных математических моделей. Представленное исследование, как и проведенные ранее [24], подтверждает адекватность построенной численной модели и пригодность для исследования реакции реального провода ЛЭП на воздействие устройством для предупреждения гололедообразования. В дальнейших исследованиях будет построена численная модель реального пролета ЛЭП и соответствующего ему полномасштабного устройства, а также будут проведены натурные эксперименты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90188.

Литература

1. Юрьев, С. Ледяной дождь: ночной кошмар для энергетиков / С. Юрьев // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2011. – № 1 (4). – С. 12–13.
2. Пат. 2666754 Российская Федерация. Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи / В.С. Ратушняк, А.В. Юрьев, Е.С. Ильин, И.С. Трухина, В.С. Ратушняк. – Оpubл. 12.09.2018, Бюл. № 26.
3. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП / В.С. Ратушняк, В.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, О.Ю. Вахрушева // *Известия Транссиба*. – 2019. – № 1 (37). – С. 102–111.
4. Ратушняк, В.С. Построение схемного решения устройства для предупреждения обледенения проводов ЛЭП / В.С. Ратушняк // *Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн.* – 2020. – № 2(8). – <http://mnv.irsups.ru/toma/28-20> (дата обращения: 29.05.2020).
5. Татмышевский, К.В. Магнитно-импульсные метательные устройства для воспроизведения в лабораторных условиях высокоскоростных ударных воздействий / К.В. Татмышевский, С.А. Козлов, А.С. Григорьев // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 3. – С. 129–136.
6. Мирошников, В.Г. Деформирование и сварка металлов давлением импульсного магнитного поля / В.Г. Мирошников, В.Я. Попов, В.Д. Александров // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 1995. – № 5. – С. 31–33.
7. Тютькин, В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов / В.А. Тютькин // *Электротехника*. – 2002. – № 11. – С. 24–28.
8. Опыт применения электроимпульсных технологий в интересах транспортной отрасли / А.И. Орленко, А.В. Юрьев, Е.С. Ильин, В.С. Ратушняк // *Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов*. – 2018. – С. 281–288.

9. A dual de-icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations / H. Habibi, L. Cheng, H. Zheng et al. // *Renewable Energy*. – 2015. – No. 83. – P. 859–870. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.025
10. Ратушняк, В.С. Обоснование необходимости разработки нового способа очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений / В.С. Ратушняк // *Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сб. науч. тр.* – Красноярск: КрИЖТ ИрГУПС, 2017. – С. 62–69.
11. Болюх, В.Ф. Пути совершенствования линейных электромеханических преобразователей импульсного действия / В.Ф. Болюх // *Электротехника и Электромеханика*. – 2006. – № 5. – С. 14–21.
12. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Курган: КГУ, 2015. – 202 с.
13. Болюх, В.Ф. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Шукин // *Электротехника и Электромеханика*. – 2015. – № 3. – С. 31–40. DOI: 10.20998/2074-272x.2015.3.05
14. Исследование эффективности ускорения проводников в импульсном магнитном поле соленоида / В.Н. Бондалетов, Е.Н. Иванов, С.Р. Петров, В.А. Тюткин // *ПМТФ*. – 1983. – № 2. – С. 82–86.
15. Тюткин, В.А. Исследование эффективности электромеханического преобразования энергии в индукционно-динамических системах с многослойными индукторами / В.А. Тюткин // *Проблемы технической электродинамики*. – 1979. – С. 252–253.
16. Болюх, В.Ф. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // *Вісник НТУ «ХПИ»*. – 2015. – № 13 (1122). – С. 45–60.
17. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
18. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
19. Бондалетов, В.Н. Индукционное ускорение проводников / В.Н. Бондалетов // *Журнал технической физики*. – 1967. – Вып. 2. – Т. 37. – С. 280–287.
20. Болюх, В.Ф. Влияния формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Шукин // *Вісник НТУ «ХПИ»*. – 2013. – № 65 (1038). – С. 63–83.
21. Болюх, В.Ф. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа / В.Ф. Болюх, И.С. Шукин // *Электротехника и Электромеханика*. – 2010. – № 5. – С. 5–11.
22. Лившиц, А.Л. Импульсная электротехника // А.Л. Лившиц, М.А. Отто. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
23. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
24. Ratushnyak, V.S. The Numerical Studies of the Reaction of the Overhead Transmission Lines to a Transverse Impact by Shaking Off Water Droplets / V.S. Ratushnyak, A.V. Livshits, N.O. Epihina // *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112040

Ратушняк Валентина Сергеевна, аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru.

Ратушняк Виктор Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы обеспечения движения поездов», Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; ratushnyak_vs@krsk.irkups.ru.

Поступила в редакцию 14 июля 2020 г.

DEVELOPMENT OF A LABORATORY UNIT FOR PREVENTING ICE FORMATION ON THE MODEL OF POWER LINES

V.S. Ratushnyak¹, ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru,

V.S. Ratushnyak², ratushnyak_vs@krsk.irkups.ru

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation,

² Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, Russian Federation

This article describes the structure of a device to prevent the formation of ice on the cables of power lines using the impulse shock method with the lateral type of fastening. The actuator of the device is a magnetic pulse electromechanical energy converter. It can ensure that the parameters of the impact match the calculated values in a wide range of times and forces. This advantage determined the choice in favor of this type of actuators. The basic functions of the device are described herein. Based on this, the functional blocks are highlighted and their description is given. The influence of various design parameters of device parts on its performance is described. We also formulated requirements for structural elements. As a result, a reasonable choice was made when designing the device. A laboratory unit was developed to prevent the formation of ice using a scaled-down model of a power transmission line cable. A system for measuring vibrations at several points of a cable is described. The results of an experimental study of wire vibrations are presented. The correspondence of the calculated and experimental values of the cable deviation is shown, which indirectly confirms the correspondence of the developed device's parameters to the calculated values.

Keywords: ice formation on power line cables, icing prevention, magnetic pulse motor, electromechanical converter, inductor.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90188.

References

1. Yur'ev S. [Icy rain: a nightmare for power engineers]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution], 2011, no. 1 (4), pp. 12–13. (in Russ.)
2. Ratushnyak V.S., Yur'ev A.V., Il'in E.S., Trukhina I.S., Ratushnyak V.S. *Sposob i ustroystvo dlya udaleniya naledi s provodov liniy elektroperedachi* [Method and device for removing ice from wires of power lines]. Patent RF, no. 2666754, 2018.
3. Ratushnyak V.S., Ratushnyak V.S., Il'in E.S., Vahrusheva O.Y. [Some aspects of choice of means of fighting with the ice deposit on the power lines]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2019, vol. 1, no. 37, pp. 102–111. (in Russ.)
4. Ratushnyak V.S. [Construction of a circuit design of a device for preventing icing of power transmission lines]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2020, no. 2 (8). Available at: <http://mnv.irkups.ru/toma/28-20> (accessed 29.05.2020).
5. Tatmyshevskiy K.V., Kozlov S.A., Grigor'ev A.S. [Magnetic-pulse throwing devices for reproducing in laboratory conditions high-speed impact]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental technique], 2008, no. 3, pp. 129–136. (in Russ.)
6. Miroshnikov V.G., Popov V.Ya., Aleksandrov V.D. [Deformation and welding of metals by pulsed magnetic field pressure]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 1995, no. 5, pp. 31–33. (in Russ.)
7. Tyut'kin V.A. [Magnetic-pulse method of destruction of arches and cleaning of technological equipment from adhering materials]. *Elektrotehnika* [Electrical technology], 2002, no. 11, pp. 24–28. (in Russ.)
8. Orlenko A.I., Yur'ev A.V., Il'in E.S., Ratushnyak V.S. [Experience in the application of electric pulse technologies in the interests of the transport industry]. *Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov* [Prospects for the development of service for locomotives], 2018, pp. 281–288. (in Russ.)
9. Habibi H., Cheng L., Zheng H., Kappatos V., Selcuk C., Gan T. A dual de-icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations. *Renewable Energy*, 2015, no. 83, pp. 859–870. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.025
10. Ratushnyak V.S. [Justification of the need to develop a new method for cleaning power transmission lines from ice deposits]. *Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: sb. nauch. tr.* [Innovative technologies in railway transport: Collected papers]. Krasnoyarsk, KIRT ISTU Publ., 2017, pp. 62–69. (in Russ.)

11. Bolyukh V.F. [Ways to improve linear electromechanical pulsed converters]. *Elektrotekhnik i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2006, no. 5, pp. 14–21. (in Russ.)
12. Usanov K.M., Moshkin V.I., Kargin V.A., Volgin A.V. *Lineynye elektromagnitnye dvigateli i privody v impul'snykh protsessakh i tekhnologiyakh* [Linear electromagnetic motors and drives in pulsed processes and technologies], Kurgan, KGU Publ., 2015. 202 p.
13. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. [Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create shock loads and high speeds]. *Elektrotekhnik i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2015, no. 3, pp. 31–40. (in Russ.) DOI: 10.20998/2074-272x.2015.3.05
14. Bondaletov V.N., Ivanov E.N., Petrov S.R., Tyut'kin V.A. [Study of the acceleration efficiency of conductors in a pulsed magnetic field of a solenoid]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics], 1983, no. 2, pp. 82–86. (in Russ.)
15. Tyut'kin V.A. [Study of the efficiency of electromechanical energy conversion in induction-dynamic systems with multilayer inductors]. *Problemy tekhnicheskoy elektrodinamiki* [Problems of technical electrodynamics], 1979, pp. 252–253. (in Russ.)
16. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. [The effect of the number of radial cuts of a ferromagnetic screen on the performance of a linear induction-dynamic converter]. *Visnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"], 2015, no. 13 (1122), pp. 45–60. (in Russ.)
17. Knopfel' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polya* [Super Pulsed Magnetic Fields], Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p.
18. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey: spravochnaya kniga* [Inductance Calculation: A Reference Book], Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
19. Bondaletov V.N. [Induction acceleration of conductors]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1967, vol. 37, iss. 2, pp. 280–287. (in Russ.)
20. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. [Influence of the shape and location of the anchor on the efficiency of the induction-dynamic motor using a 3D model]. *Visnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"], 2013, no. 65 (1038), pp. 63–83. (in Russ.)
21. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. [Circuit design improvements of shock electromechanical transducers of induction type]. *Elektrotekhnik i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2010, no. 5, pp. 5–11. (in Russ.)
22. Livshits A.L., Otto M.A. *Impul'snaya elektrotekhnik* [Pulse Electrical Engineering], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 352 p. (in Russ.)
23. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and Dimension Methods in Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 440 p.
24. Ratushnyak V.S., Livshits A.V., Epihina N.O. The Numerical Studies of the Reaction of the Overhead Transmission Lines to a Transverse Impact by Shaking Off Water Droplets. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112040

Received 14 July 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ратушняк, В.С. Разработка лабораторной установки для предупреждения образования льда на модели провода ЛЭП / В.С. Ратушняк, В.С. Ратушняк // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 43–53. DOI: 10.14529/power200405

FOR CITATION

Ratushnyak V.S., Ratushnyak V.S. Development of a Laboratory Unit for Preventing Ice Formation on the Model of Power Lines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 43–53. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200405