

УДК 621.315.175, 537.85

А. В. Лившиц, Вал. С. Ратушняк

*Иркутский государственный университет путей сообщений*

Вик. С. Ратушняк

*Красноярский институт железнодорожного транспорта*

## **Методика определения параметров устройства предотвращения образования льда на проводах ЛЭП**

*На территории России, Китая, Канады и некоторых стран Европы актуальна проблема обледенения проводов ЛЭП в холодное время года. Традиционным решением является тепловой метод, однако его низкая энергоэффективность, трудоемкость, риск повреждения проводов способствуют разработке альтернативных способов борьбы с обледенением. Ударно-вибрационные методы считаются наиболее энергоэффективным решением для удаления льда с проводов. Предложена методика определения параметров устройства ударного принципа действия для предотвращения гололедообразования путем удаления капель воды до их замерзания. Удаление капель воды основано на создании силы инерции «встряхиванием» провода с небольшой амплитудой относительно диаметра провода и достаточным ускорением. Такое воздействие на провод оказывает индукторная система устройства, элементы которой отталкиваются друг от друга под воздействием электромагнитных сил, возникающих при разряде накопителя энергии. Методика представляет собой поэтапный процесс. На основе анализа параметров пролета и провода, а также принятых решений о месте, способе крепления устройства и его принципе действия выполняется поиск оптимальных параметров удара. Затем рассчитываются электрические и массо-габаритные параметры. Приводится расчет установки для модельного пролета ЛЭП в уменьшенном масштабе. Данные, полученные в результате расчетов по указанной методике, могут быть использованы для разработки рабочего устройства.*

### **Линии электропередачи, предотвращение обледенения, индуктивный электромеханический преобразователь энергии, электромеханический способ, ударно-стряхивающий метод, методика определения параметров**

Недопущение гололедных аварий является важной стратегической задачей энергетических компаний по всему миру [1], [2]. На сегодняшний день предложено большое количество средств и методов для борьбы с гололедообразованием. Исследованием их эффективности, сравнительным анализом и классификацией занимались как отечественные, так и зарубежные ученые [3]–[5]. Большинство изобретений относится к тепловым методам, главные недостатки которых – низкая энергоэффективность, а также необходимость отключения потребителей на время удаления наледи, высокая стоимость и опасность отжига проводов [6]. Ударно-вибрационные методы считаются наиболее энергоэффективным решением удаления льда с проводов [3]–[7], однако до сих пор остается открытым вопрос о принципе работы исполнительного устройства.

Ударно-вибрационные устройства можно разделить на действующие локально и по всей длине

пролета. Действие устройств, вызывающих собственные колебания проводов вдоль всего пролета, основано на силе Ампера [8], [9]. Эти методы могут вызывать усталостное разрушение проводов, арматуры и изоляторов, поскольку предполагают резонансные колебания проводов с достаточно большими амплитудами, в том числе с соударением. Среди локально действующих устройств известны исполнительные механизмы на основе пневматической [10], цилиндро-поршневой [7] и индукторной систем [9], [11]. Отсутствие электрического контакта с проводом ЛЭП – это преимущество данного типа устройств, однако значительную сложность вносит задача распространения ударного импульса по всей длине пролета.

Недавно проведенные численные исследования [12] показали влияние параметров удара на характер колебаний провода. Сила удара, его длительность и направление могут быть выбраны таким образом, что при низкой амплитуде коле-

баний (относительно диаметра провода) ускорение будет достаточно высоким для «стряхивания» капель замерзающей воды или снега. Это связано с тем, что при распространении бегущей волны время перехода из одного крайнего колебательно-го положения в другое сокращается с одновременным увеличением времени нахождения в этом крайнем колебательном положении. Данное свойство может быть использовано для освобождения проводов ЛЭП от капель воды до их замерзания, что энергетически более выгодно, чем удаление льда. Диапазон параметров воздействий, способствующих удалению капель при малой амплитуде колебаний, достаточно узок и зависит от параметров провода и тяжения.

Выбор принципа действия исполнительного устройства, реализующего предотвращение образования льда на проводах ЛЭП стряхиванием капель воды до их замерзания, обоснован способностью генерировать расчетное воздействие. Таким устройством может выступать индуктивный электромеханический преобразователь энергии (ЭПЭ) [13]. Принцип его работы основан на возникновении электромагнитных сил, которые при разряде накопителя на индукторную систему (ИС) – индуктор и исполнительный элемент – вынуждают их отталкиваться друг от друга. При этом в зависимости от электрических и массогабаритных параметров устройство может совершать удары с высокими скоростями (сотни микросекунд) и силой (десятки–тысячи ньютонов). Индуктивные ЭПЭ находят свое применение в сфере обработки металлов давлением [14], для генерации невзрывных сейсмических волн [15], в испытательных стендах на ударные нагрузки [16], при разрушении сводов и очистке оборудования [17], [18], в том числе ото льда [19], [20].

**Постановка задачи.** Поскольку устройство для предупреждения образования льда на проводах [21], [22] должно, с одной стороны, обеспечивать достаточное ускорение и амплитуду бегущей волны, с другой – не допускать негативных последствий колебаний (пляска проводов, вибрация или превышение допустимых нагрузок и т. п.), требуется определить оптимальные параметры воздействия. Для этого необходимо сформулировать оптимизационную задачу и критерии удаления капли воды. Решение оптимизационной задачи подразумевает многократное вычисление динамики провода и присоединенной массы при различных условиях удара. Ввиду сложности за-

дачи математического моделирования удара по металлическому тросу в статье предложено использовать разработанную и верифицированную численную модель [12]. Для сокращения количества вычислений необходимо разработать алгоритм поиска оптимального решения. Следует отметить, что несмотря на простоту принципа действия индуктивных ЭПЭ, для них характерна сложная взаимосвязь между параметрами ИС и емкостного накопителя энергии, при которых реализуется необходимая техническая операция – в данном случае перемещение бойка на заданное расстояние с определенным ускорением и его последующий возврат в исходное положение. В связи с этим необходимо отыскать ключевые входные параметры устройства, позволяющие определить зависимые параметры. Также следует установить набор входных параметров провода и капли воды. Для расчета параметров электромеханической установки следует выбрать такую модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в магнитно-импульсном ЭПЭ, которая обеспечит учет сил сопротивления движению бойка. Предполагается, что методика позволит за две-три итерации оптимизационного алгоритма рассчитывать основные электрические и конструктивные параметры устройства для предупреждения образования льда на проводах ЛЭП.

**Теоретическая часть.** Предлагаемая методика определения параметров устройства предотвращения образования льда является итерационным, многоэтапным процессом. Начинается она с этапа сбора входных параметров.

Параметры провода: погонный вес (кг/м), площадь поперечного сечения (мм<sup>2</sup>) и диаметр провода (мм), модуль Юнга (ГПа). Если известна марка провода, то эти параметры можно получить из справочной литературы. Если марка провода неизвестна, то следует измерить погонный вес провода и его диаметр, а также диаметр проволоки каждого типа, затем рассчитать площадь поперечного сечения провода как сумму поперечных сечений проволок по формуле

$$S_{\text{пр}} = \pi \sum_{i=1}^n r_i^2,$$

где  $S_{\text{пр}}$  – площадь поперечного сечения провода;  $n$  – количество проволок в проводе;  $r_i$  – радиус  $i$ -й проволоки в проводе. Измерить модуль Юнга можно по одной из известных методик, например [23].

Параметры пролета: длина пролета (м), стрела провеса (м), тяжение (распор) (Н) при нагрузке от собственного веса. Поскольку эти параметры связаны известной зависимостью [24], то, задав одну, несложно получить другую:

$$N = \frac{pL^2}{8f},$$

где  $N$  – тяжение;  $p$  – погонный вес провода;  $L$  – длина пролета;  $f$  – стрела провеса.

Из волнового уравнения для весомой, линейно упругой нити, не сопротивляющейся изгибу, следует вычислить скорость распространения бегущей волны:

$$b = \sqrt{N/p}. \tag{1}$$

Параметры устройства: для начала расчетов необходимо задать место размещения устройства и способ его закрепления (возможные варианты и их влияние на конструктивное исполнение рассмотрены в [22]). Затем следует задать внешний и внутренний диаметры индуктора, а также толщину изоляции его спирали. Это позволит составить ограничение на время удара, которое соответствует половине периода импульса, что в выражении через частоту разряда определяется как

$$t_{уд} = \frac{1}{2f_{имп}}.$$

В свою очередь, частота незатухающих колебаний при разряде конденсатора на  $RL$ -цепь может быть рассчитана из выражения [25]

$$f_{имп} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Емкость определяется характеристиками конденсатора, индуктивность без учета поправок может быть рассчитана по формуле [26]

$$L = \frac{\mu_0 w^2 ds \Psi}{8\pi},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $w$  – число витков катушки индуктора;  $ds$  – средний диаметр индуктора;  $\Psi$  – коэффициент, который зависит от отношения толщины токовой полосы индуктора  $r$  к его среднему диаметру:

$$w = \frac{D-d}{2(\Delta_s + 2\Delta_i)};$$

$$ds = \frac{D+d}{2}; \quad r = \frac{D-d}{2},$$



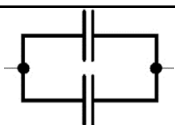
где  $\Delta_s$ ,  $\Delta_i$  – толщины провода и изоляции спирали индуктора соответственно. Упростив представленные уравнения и задав константами  $d$ ,  $D$  и  $\Delta_i$ , составим функциональную зависимость от двух переменных:

$$t_{уд} = \frac{D-d}{8(\Delta_s + 2\Delta_i)} \sqrt{(D+d)\pi\mu_0\Psi C}. \tag{2}$$

Используя (2), следует построить семейство кривых для набора емкостей. Рекомендуется отдать предпочтение высоковольтным импульсным пусковым конденсаторам в связи с особенностями разряда конденсатора 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. Для определения набора возможных емкостей была составлена табл. 1 на основе анализа параметров пусковых конденсаторов, представленных в продаже.

На втором этапе на основании входных данных необходимо задать параметры численной модели. Для численных исследований реакции

Таблица 1

Напряжение, В	Емкость, мкФ	Способ подключения		
				
Параметры выбранного конденсатора		+/- (наличие конденсатора с выбранными параметрами)	+/- (наличие конденсаторов, обеспечивающих при последовательном подключении выбранные параметры)	+/- (наличие конденсаторов, обеспечивающих при параллельном подключении выбранные параметры)

провода на удар выбрана конечно-элементная модель стержня Эйлера–Бернулли в нелинейной постановке, реализованная в коммерческом программном продукте кинематического анализа Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) [27] компании «MSC.Software» (США). Этот программный продукт реализует метод многотельного моделирования (multibody simulation, MBS) и подход ANCF (absolute nodal coordinates formulation, формулировка абсолютных узловых координат) для описания движения. Назначение метода MBS заключается в изучении динамического поведения системы, состоящей из множества взаимосвязанных жестких или упругих тел, испытывающих большие перемещения и/или вращения. За счет малой размерности системы уравнений динамики упругого тела обеспечивается быстрый расчет его движения без существенной потери точности. Благодаря использованию в качестве узловых координат положения узлов в глобальной системе координат и их производных вместо деформаций и небольших поворотов сохраняется матрица постоянной массы и отсутствует квадратичный вектор скорости, в то же время учитываются вращательная инерция, сдвиг и кручение, что обеспечивает решение задач при больших ускорениях. Все эти преимущества определили выбор инструмента для численных исследований.

Для построения численной модели провода требуется определить коэффициенты жесткости. Поскольку обычно провод изгибается намного легче, чем растягивается, и несколько легче скручивается, чем растягивается, рекомендуемые значения для коэффициентов осевой  $R_{kx}$ , изгибной  $R_{kb}$  и крутильной  $R_{kt}$  жесткостей лежат в областях  $R_{kx} > 1$ ,  $R_{kb} \ll 1$  и  $R_{kt} < 1$ . В соответствии с этими рекомендациями задаются коэффициенты жесткости и проверяется соответствие стрелы провеса и тяжения расчетным значениям. Коэффициент тяговой системы позволяет регулировать длину провода, стрелу провеса и тяжение.

Коэффициент демпфирования должен обеспечивать корректное значение собственной частоты колебаний. Следует вычислить собственную частоту колебаний  $n$ -й гармоники:

$$v_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{N}{p}}, \quad (3)$$

затем сопоставить это значение с собственной частотой провода в Adams. Это можно выпол-

нить, возбуждая свободные колебания провода при помощи поперечного удара маятником, воспользовавшись затем расчетом быстрого преобразования Фурье.

Определение параметров модели капли подразумевает выбор диаметра и высоты капли, удаление которой будет исследоваться. Будем рассматривать удаление висящей капли на основании того, что капли воды под действием силы тяжести скатываются с верхних и боковых сторон провода и собираются внизу. Строго говоря, форма висящей капли отличается от формы сектора шара, однако это отличие невелико и для наших расчетов мы им пренебрежем. Таким образом, заменим каплю ее математической моделью в сферическом приближении [28] – сектором шара высотой  $h$  и радиусом основания  $r$ . Незамерзшая капля воды удерживается на проводе за счет силы поверхностного натяжения. Удаление капли происходит под действием силы инерции. Срыв капли происходит, если сила инерции превышает силу поверхностного натяжения, а также если амплитуда колебаний провода превышает диаметр висящей капли:

$$F_{рез} \geq 2\pi r \sigma; \quad (4)$$

$$A_{min} \geq 2r, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м, который зависит от температуры. Критерий (5) определен как приближенное значение на основе проанализированных экспериментальных работ [29], [30], где длина перемычки до отрыва капли сопоставима с диаметром капли при статическом исследовании и амплитуда вибрации при ультразвуковом разбрызгивании капель составляет 10 % от радиуса капли.

Третий этап – подготовка численной модели к экспериментам – описан в [12]. Общий принцип проверки выполнения критериев отсоединения капель (4), (5) заключается в установке датчиков (sensors), следящих за значениями контрольных параметров. При достижении параметром критического значения происходит отключение связи между элементами. Код скрипта симуляции при этом выглядит следующим образом:

```
DEACTIVATE/SENSOR, ID=1, 2, ..., n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.0,
STEPS=300
SIMULATE/STATIC
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2,
STEPS=15000
```

```

ACTIVATE/SENSOR, ID=1, 2, ..., n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2,
STEPS=15000
DEACTIVATE/SENSOR, ID=1
DEACTIVATE/JOINT, ID=1
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2,
STEPS=15000
DEACTIVATE/SENSOR, ID=2
DEACTIVATE/JOINT, ID=2
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2,
STEPS=15000
...
DEACTIVATE/SENSOR, ID=n
DEACTIVATE/JOINT, ID=n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2,
STEPS=15000

```

Четвертый этап – поиск оптимального решения – подразумевает получение значения оптимальной для исследуемого пролета силы и времени удара. Оптимизационная задача формулируется следующим образом: необходимо вычислить оптимальные значения набора управляющих параметров  $\{F_{уд}, t_{уд}\}$  (сила удара, время удара), обеспечивающих минимальное значение целевого показателя  $\{I_{уд}\}$  (импульс силы удара)

$$I_{уд} \rightarrow \min$$

при выполнении ограничений (4), (5). Решение данной задачи, блок-схема алгоритма которого представлена на рис. 1, носит итеративный характер.

Нулевая итерация заключается в проведении ряда численных экспериментов с целью определения диапазона сил для граничных значений времени, полученных на втором этапе. За минимальную силу следует принять то значение, при котором ограничения (4), (5) не выполняются, за максимальное – то, при котором они выполняются. Цель проведения дальнейших итераций – поиск оптимальных значений параметров удара путем увеличения шага дискретизации.

До перехода к первой итерации принимается решение о дискретизации силы и времени удара. Это решение является результатом экспертной оценки: рекомендуемое значение для каждого параметра – 4. Количество планируемых численных экспериментов  $N$  определяется по формуле

$$N = \prod_{i=1}^k S_i,$$

где  $S_i$  – дискретизация  $i$ -го параметра.

В результате численных экспериментов, проведенных на  $n$ -й итерации, в множество Парето может попасть меньшая доля из  $N$  расчетных точек, поэтому для уточнения фронта Парето и точки оптимума потребуется повторить итерацию расчета. С каждой итерацией следует увеличивать дискретизацию вдвое – это обеспечит достаточное уточнение информации за приемлемое время

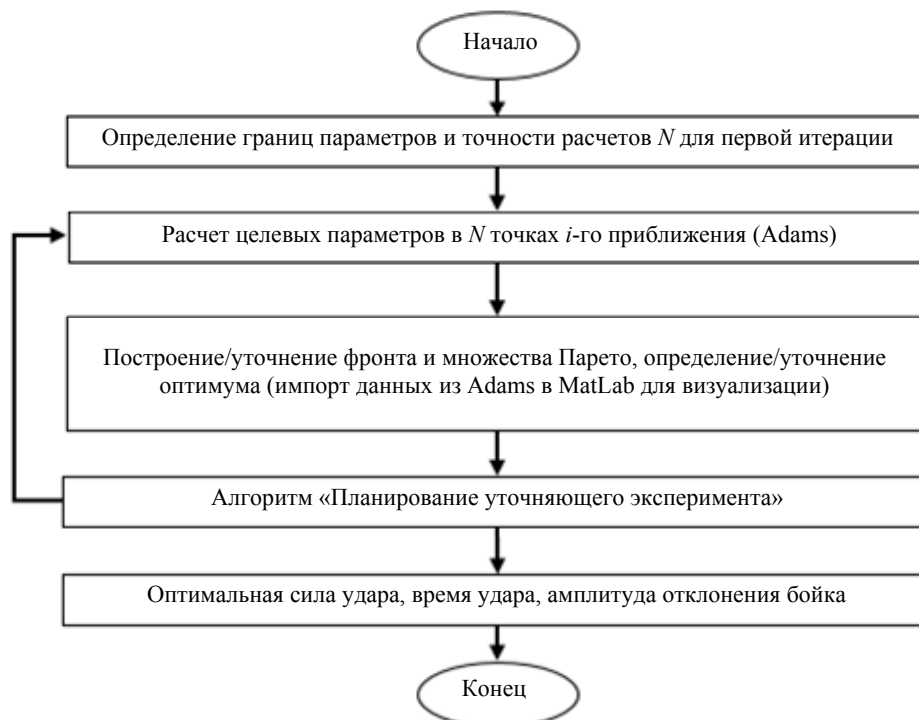


Рис. 1

численных экспериментов. Схематичное представление области, подлежащей вычислению, представлено на рис. 2.

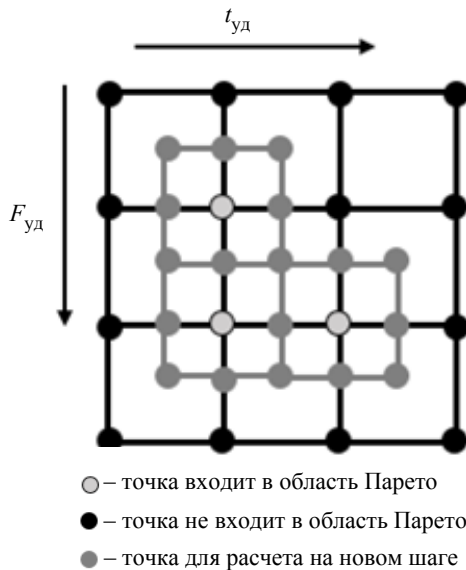


Рис. 2

Для упрощения задачи анализа значений, полученных на очередной итерации, а также оценки временных затрат на следующую итерацию и проведения наиболее значимых экспериментов предлагается алгоритм «Планирование уточняющего эксперимента». Алгоритм формирует таблицу управляющих параметров  $\{F_{уд}, t_{уд}\}$ , отсортированную по возрастанию импульса силы  $\{I_{уд}\}$ . В таблицу не входят строки, для которых ограничения (4), (5) не выполняются.

Задача поиска оптимального решения может считаться выполненной с достаточной степенью точности, когда получены значения амплитуды и результирующей силы инерции, удовлетворяющие ограничениям, при не достигнутом целевом показателе. Результатами выполнения этапа служат оптимальные сила и время удара, а также амплитуда отклонения бойка при этом ударе.

Пятый этап – определение электрических параметров индуктора. В устройстве предупреждения гололедообразования возникающая кинетическая энергия передается с помощью штанги непосредственно на провод. Электродинамическое взаимодействие индуктора и проводника (без учета нагрева его индуктивным током) опишем системой дифференциальных уравнений двухконтурной схемы замещения, включающей уравнения теории электрических цепей и механики [31]:

$$\begin{aligned} &(L_0 + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_0 + R_1)i_1 + \\ &+ M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} = U_C; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} &= 0; \quad (6) \\ C \frac{dU_C}{dt} &= -i_1; \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{i_1 i_2}{m} \frac{dM}{dx} - \frac{f_x(t, x)}{m}, \end{aligned}$$

где  $i_1, i_2$  – токи в индукторе и бойке соответственно;  $M$  – взаимная индукция между индуктором и бойком;  $C, U_C$  – емкость и напряжение накопителя;  $x$  – координата перемещения бойка;  $m$  – масса бойка и присоединенной штанги;  $f_x(t, x)$  – сила сопротивления движению бойка, в общем случае зависящая от его координаты и времени.

Для учета влияния сил трения бойка о корпус устройства, упругости возвратной пружины, а также сопротивления провода, зависящего от натяжения и углов наклона провода  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  в местах примыкания к бойку, нами предложено выражение

$$f_x(t, x) = kx + \mu mg + N(\sin \gamma_1 + \sin \gamma_2),$$

где  $k$  – коэффициент упругости возвратной пружины;  $\mu$  – коэффициент трения.

Входными параметрами для системы (6) служат данные, полученные на предыдущих этапах. Решение системы выполняется численным методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Необходимо получить соответствие координат перемещения бойка  $x$  перемещению бойка, вычисленному на предыдущем этапе. Отсюда следует значение напряжения заряда конденсатора и другие электрические и массо-габаритные параметры устройства. На основании полученной информации окончательный перечень параметров устройства включает в себя: емкость и напряжение заряда, один или несколько вариантов подключения конденсаторов для их реализации, массо-габаритные и электрические параметры ИС.

**Практическая часть.** По разработанной методике проведен расчет основных параметров устройства для предупреждения образования льда для модели провода ЛЭП в уменьшенном масштабе. В качестве модельного выбран витой провод из высокоуглеродистой оцинкованной стали. Погонный вес провода 0.012 кг/м, площадь

поперечного сечения – 1.52 мм<sup>2</sup>, диаметр – 1.39 мм, модуль Юнга – 189.9 ГПа, длина пролета – 7 м, стрела провеса – 14.33 мм, тяжеие – 49 Н. Рассчитанная по (1) скорость распространения бегущей волны равна 63.92 м/с.

Определены параметры исполнительного устройства: боковой способ крепления в центре пролета. Поскольку приведенный расчет выполняется для модели ЛЭП в уменьшенном масштабе, габариты ИС должны быть уменьшены пропорционально. Однако индуктор и боек нельзя уменьшить до размеров, когда их вес будет значительно меньше веса модельного пролета. В связи этим принято решение о закреплении устройства на «земле», что минимизирует весовую нагрузку на провод. Физическая реализация и относительное расположение корпуса индуктора 1, бойка 2, штанги 3, провода 4 приведены на рис. 3.

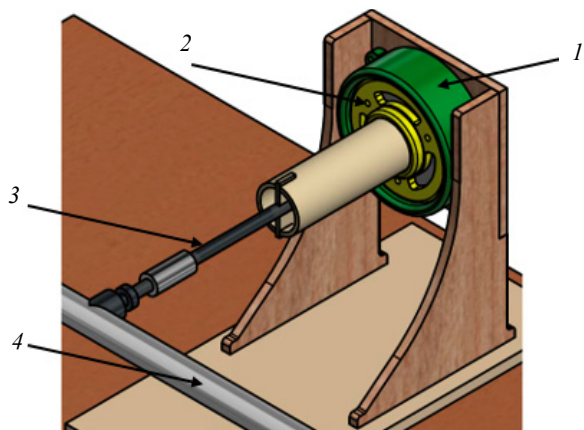


Рис. 3

Проведен анализ параметров пусковых конденсаторов, представленных в продаже, в результате чего определен набор возможных емкостей (табл. 2).

С использованием уравнения (2) построено семейство кривых (рис. 4) при выбранных константах  $D = 0.055$  м,  $d = 0.002$  м,  $\Delta t_i = 0.00001$  м. Таким образом задан возможный диапазон времен импульса от 200 до 400 мкс.

Затем построена модель пролета в MSC Adams. Коэффициенты жесткости: осевой  $R_{kx} = 1$ , изгибной  $R_{kb} = 0.1$ , крутильной  $R_{kt} = 0.1$ ; коэффициент демпфирования 0.001. Рассчитана собственная частота первой гармоники (4.56 Гц) по формуле (3), что совпадает с собственной частотой модели провода 4.72 Гц. Выбраны параметры удаляемой капли воды: коэффициент поверхностного натяжения воды  $75.62 \cdot 10^{-3}$  Н/м при 0 °С [32], радиус и высота капли 1 мм. Критическая сила инерции, вычисленная по (4), составляет  $4.75 \cdot 10^{-4}$  Н.

Для выбранного диапазона времен проведен поиск силы удара, при которой происходит выполнение критериев удаления капли. Проверка удаления каплей выполняется по всей длине пролета, исключая 0.1 м от мест закрепления, поскольку колебания больших амплитуд в местах крепления провода нежелательны, а образование льда на концах пролета не критично. Начальный диапазон времен выбран от 200 до 400 мкс с дискретизацией 100 мкс. Методом численных экспериментов определено, что в этой области времен удара граничные силы находятся в диапазоне от 600 до 1200 Н. Для этого диапазона выбран шаг 200 Н. Таким образом, на первой итерации проведено 12 численных экспериментов. По алгоритму «Планирование уточняющего эксперимента» рассчитано, что на следующей итерации при дискретизации времени 50 мкс и силы 100 Н необходимо провести 16 экспериментов общей продолжитель-

Таблица 2

Напряжение, В	Емкость, мкФ	Способ подключения		
300	400	+	+ (два конденсатора по 800 мкФ, суммарное напряжение 600 В)	+ (два конденсатора по 200 мкФ, напряжение 300 В)
	600	+	+ (два конденсатора по 1200 мкФ, суммарное напряжение 900 В)	+ (два конденсатора по 300 мкФ, напряжение 300 В)
	900	-	-	+ (два конденсатора по 450 мкФ, напряжение 300 В)



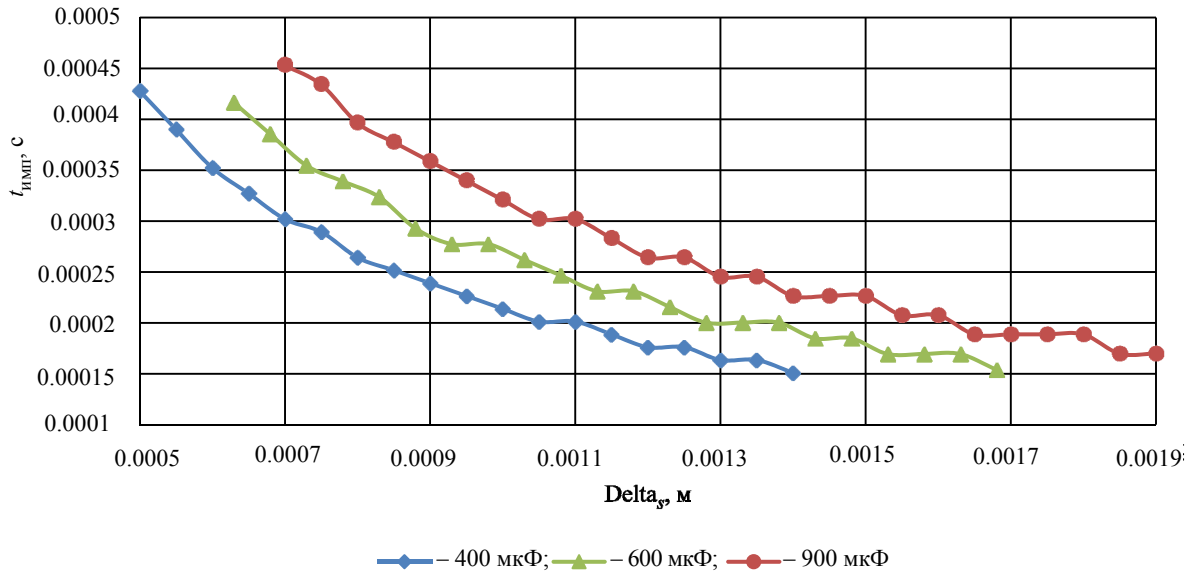


Рис. 4

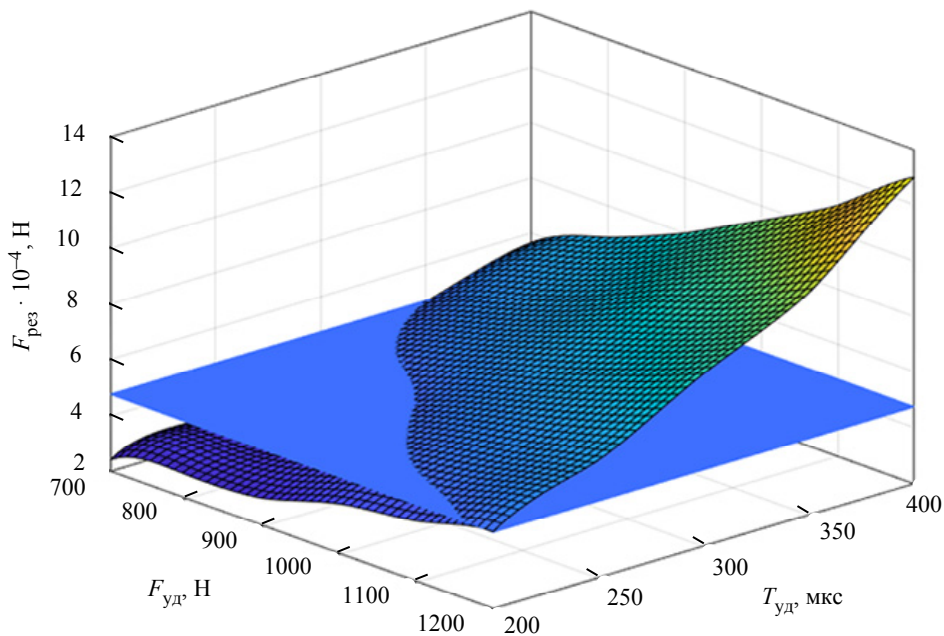


Рис. 5

ностью 240 мин (из расчета 15 мин на эксперимент). Поверхность Парето для капли, находящейся на расстоянии 0.1 м от конца пролета, представлена на рис. 5. Горизонтальная поверхность на рисунке соответствует ограничению (4). Ограничение (5) на рисунке не представлено, поскольку оно выполняется для всех рассмотренных точек. Однако уже на пятом эксперименте становится известно, что в рассматриваемой области оптимальна точка с параметрами 200 мкс, 1200 Н (отклонение бойка 13.7 мм); следующая за ней точка – 250 мкс, 1000 Н (отклонение бойка 14 мм). Принято решение рассчитать электрические параметры устройства для обеих точек.

В результате решения системы (6) получены значения напряжения заряда конденсатора при всех рассмотренных вариантах параметров (табл. 3).

Таблица 3

Емкость, мкФ	Время удара, мкс			
	200		250	
	Delta <sub>s</sub> , мм	U, В	Delta <sub>s</sub> , мм	U, В
400	1.05	480	0.85	370
600	1.28	390	1.08	300
900	1.60	310	1.20	230

Сопоставляя табл. 2 и 3, приходим к выводу, что для емкостей 400 и 600 мкФ единственный вариант подключения конденсаторов – последовательный, с емкостью 800 и 1200 мкФ соответ-



Таблица 4

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	1000
Время удара, с	$250 \cdot 10^{-6}$
Отклонение бойка, м	$14 \cdot 10^{-3}$
Сила инерции капли на конце пролета, Н	$0.505 \cdot 10^{-3}$

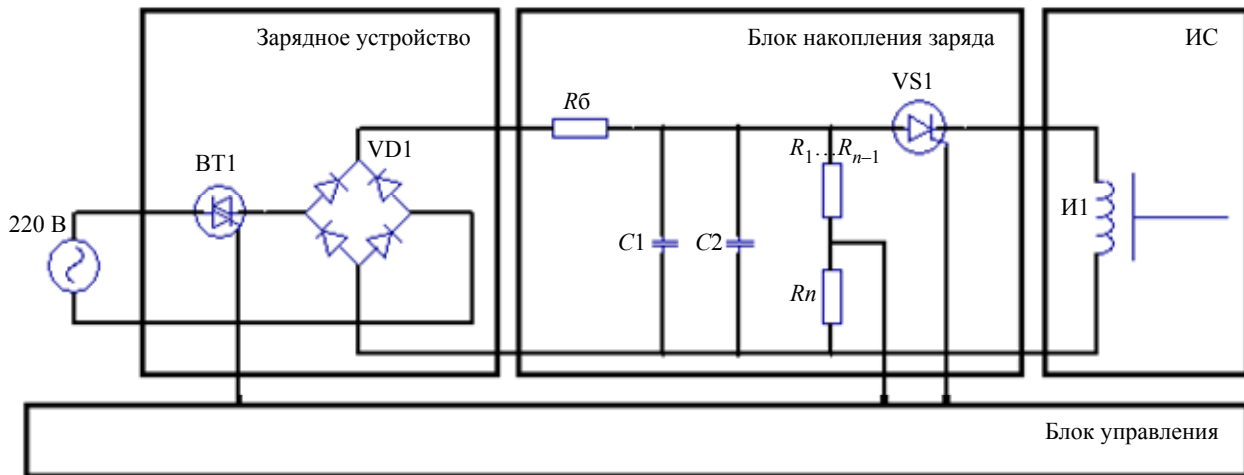


Рис. 6

ственно, что обеспечит достаточный уровень напряжения. Для емкости 900 мкФ можно использовать вариант параллельного подключения двух конденсаторов емкостью 450 мкФ, однако это решение подходит только для времени удара 250 мкс. В результате данному решению отдано предпочтение, поскольку оно обеспечивает некоторый запас по напряжению заряда, снижение тока, проходящего через каждый конденсатор, что уменьшает риск их выхода из строя, а также является наиболее бюджетным.

По разработанной методике рассчитаны параметры устройства предотвращения образования льда на проводах ЛЭП (табл. 4).

Схема подключения рассчитанных конденсаторов и индукторной системы в принципиальную схему устройства приведена на рис. 6, где 220 В – источник питания переменного напряжения, BT1, VS1 – силовые электронные ключи, VD1 – выпрямитель (диодная сборка), Rб – балластное сопро-

тивление, C1, C2 – емкостный накопитель энергии, R1–Rn – высоковольтные делители, И1 – ИС.

В результате определения параметров устройства для предотвращения гололеда на проводах ЛЭП по предложенной методике могут быть получены его основные электрические и конструктивные параметры, оптимальные параметры удара, генерируемого ИС, для стряхивания воды по всей длине пролета с минимальной амплитудой колебания провода. Разработанная методика опробована при проектировании установки для модельного пролета в уменьшенном масштабе при закреплении индуктора на «земле». Для расчета параметров полномасштабного устройства методика может быть применена без изменений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90188. The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90188.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев С. Ледяной дождь: ночной кошмар для энергетиков // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 1 (4). С. 12–13.

2. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ / В. С. Ратушняк,

- В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, О. Ю. Вахрушева // Молодая наука Сибири. 2018. № 1 (1). С. 107–113.
3. Farzaneh M. Atmospheric icing of power networks. Springer, 2008. P. 381.
4. Никитина И. Э., Абдрахманов Н. Х., Никитина С. А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. 2015. № 3. С. 794–823.
5. Espinoza E. H. Principle of functioning of smart solution to clean high power lines in cold climate. Tromsø: UiT The Arctic University of Norway, 2018. P. 75.
6. Ратушняк В. С. Обоснование необходимости разработки нового способа очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений // XXI Межвузовская науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте». Красноярск, 2017. С. 62–69.
7. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond, B. Lamarche, D. Bouchard, B. Panaroni, M. Hamel // The 11<sup>th</sup> Int. workshop on atmospheric icing of structures. Canada, 2005. P. 399–404.
8. Пат. 2442256 (РФ) Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / В. М. Козин, В. А. Соловьев, Д. А. Орлов, С. И. Сухоруков, К. С. Малых. № 2010144485/07. Заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.
9. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods / R. I. Egbert, R. L. Scharag, W. D. Bernhart, G. W. Zumwalt, T. J. Kendrew // IEEE Power & Energy Society. 1989. № 4 (3). P. 1855–1861.
10. Pat. 2207152 (CA). Apparatus for deicing overhead wires and cables // Allaire M. A., Laforte J. L., 1998.
11. Болюх В. Ф., Олексеев С. В., Шукин И. С. Практическая реализация линейных импульсных электромеханических преобразователей в промышленных устройствах // Вісник НТУ «ХПІ». 2016. № 11 (1183). С. 55–63.
12. 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 Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. P. 1–6.
13. Карпенко Л. Н. Быстродействующие электродинамические отключающие устройства. Л.: Энергия, 1973.
14. Мирошников В. Г., Попов В. Я., Александров В. Д. Деформирование и сварка металлов давлением импульсного магнитного поля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1995. № 5. С. 31–33.
15. Детков В. А. Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками // J. of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2009. № 2 (3). С. 298–304.
16. Испытательная техника: справочник: в 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1.
17. Тютюкин В. А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. 2002. № 11. С. 24–28.
18. Опыт применения электроимпульсных технологий в интересах транспортной отрасли / А. И. Орленко, А. В. Юрьев, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк // III Международ. науч.-практ. конф. «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». М., 2018. С. 281–288.
19. 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, V. Kappatos, C. Selcuk, T. Gan // Renewable Energy. 2015. № 83. P. 859–870.
20. Аппаратный комплекс по удалению наледи с водостоков и карнизов зданий электроимпульсным способом / Т. А. Сергиенко, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк, А. В. Юрьев // XIX Межвузовская науч.-практ. (заочная) конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». Красноярск, 2015. С. 73–76.
21. Пат. 2666754 (РФ) 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 № 2017136405. Заявл. 16.10.2017; опубл. 12.09.2018.
22. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП / В. С. Ратушняк, В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, О. Ю. Вахрушева // Изв. Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 102–111.
23. Клыков И. И. Определение модуля Юнга из деформации растяжением: метод. указ. для вып. лаб. раб. Томск: Изд-во «Дом ТГУ», 2014.
24. Виноградов Г. Г. Расчет строительных пространственных конструкций / под ред. И. И. Кудревич. Л.: Стройиздат, 1990.
25. Теоретические основы электротехники: учебник / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. Т. 2.
26. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Изд-во Энергоатомиздат, 1986.
27. Иванов А. А. MSC.ADAMS: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования: учеб. пособие. М.: Московское представительство MSC.Software GmbH, 2003.
28. Матюхин С. И., Фроленков К. Ю. Форма капля жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. № 3. С. 292–304.
29. Розина Е. Ю. Капиллярно-вибрационное распыление жидкости // Акустичний вісник. 2002. Т. 5, № 2. С. 43–53.
30. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Трансформации перемишки в процессе отрыва капли // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 3. С. 16–31.
31. Бондалетов А. Н., Андреев В. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод // Электричество. 1973. № 10. С. 36–41.
32. Краткий справочник физико-химических величин. 7-е изд. / под ред. К. П. Мищенко, А. А. Равделя. Л.: Химия. 1974.

A. V. Livshits, V. S. Ratushnyak  
Irkutsk State Transport University, Irkutsk

V. S. Ratushnyak  
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport

## METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF THE DEVICE FOR THE PREVENTION OF ICE FORMATION ON POWER LINES

*In Russia, China, Canada and some European countries, the problem of icing wires of power lines in the cold season is relevant. The traditional solution is the thermal method, but its low energy efficiency, laboriousness, risk of damage to the wires contribute to the development of alternative ways to combat icing. Shock-vibration methods are considered the most energy-efficient solution for removing ice from wires. The article proposes a methodology for determining the parameters of the shock principle of action to prevent icing by removing droplets of water before they freeze. Removing water drops is based on creating inertia by «shaking» the wire with a small amplitude relative to the diameter of the wire and sufficient acceleration. Such an effect on the wire is exerted by the inductor system of the device, the elements of which are repelled from each other under the influence of electromagnetic forces arising from the discharge of the energy storage device. The technique is a phased process. Based on an analysis of the parameters of the span and wire, as well as decisions made about the place, the method of mounting the device and its principle of operation, a search is made for the optimal parameters of the impact. Then the calculation of the electrical and mass-dimensional parameters. The article presents the calculation of the installation for a model power transmission span on a reduced scale. The data obtained as a result of calculations by the method can be used to develop a working device.*

**Overhead transmission lines, icing prevention, inductive electromechanical energy converter, electromechanical method, shock-shaking method, method for determining parameters**

УДК 621.3.07

А. С. Анучин, Е. О. Столяров, Д. М. Шпак, Д. К. Сурнин  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Г. Л. Демидова  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий механики и оптики

Р. Ахмед  
Ноттингемский университет» (Великобритания)

## Система подчиненного регулирования с параллельной коррекцией по напряжению выхода понижающего преобразователя постоянного тока

*Понижающие преобразователи повсеместно используются в промышленности и на транспорте, а также в системах с возобновляемыми источниками энергии. Однако большинство исследований способов управления такими преобразователями посвящены маломощным системам, работающим в режиме прерывистого тока, или способам, использующим сложный математический аппарат, чувствительный к изменению параметров, не учитывая при этом ограничения тока и внешние возмущения. В данной статье представлен способ подчиненного регулирования понижающего преобразователя постоянного тока, идея которого была взята из теории управления электроприводов и реализована в источнике питания собственных нужд, используемого в вагонах подвижного состава метрополитена. Получены результаты моделирования работы преобразователя с предложенной системой управления с учетом различных возмущений и неточностей датчиков.*

**Понижающий преобразователь, подчиненное регулирование, непрерывный ток, регулятор тока, регулятор напряжения, положительная обратная связь**

Понижающие преобразователи постоянного тока используются для питания светодиодов, в заряжающих устройствах, источниках питания различных типов и др. В настоящее время суще-