

Поиск методов повышения эффективности устройств молниезащиты с помощью математического моделирования

Александр Чусов
АО НПО Стример
alexander.chusov@streamer.ru

Александр Чистяков
АО НПО Стример
alexander.chusov@streamer.ru

Матвей Аполинский
АО НПО Стример
alexander.chusov@streamer.ru

Abstract—Данная статья посвящена результатам применения математического моделирования к проектированию устройств молниезащиты на примере разрядников мультикамерного типа (РМК). Показано, что ранее разработанная и описанная в предыдущих публикациях математическая модель дугового разряда позволяет давать достаточно точные оценки эффективности перспективных вариантов конструкции РМК и таким образом ускорять поиск новых технических решений. В качестве иллюстрации возможностей методики приведены результаты расчёта оптимального объёма напорной камеры РМК.

Ключевые слова—молниезащита, разрядник, искровой разряд, моделирование, сопровождающий ток

I. ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование успешно применяется при проектировании электроаппаратов уже достаточно давно. Наиболее заметный прогресс был достигнут в области коммутационных аппаратов, где моделирование дуги отключения часто становится неотъемлемым этапом разработки [1]. Первые попытки добиться такого же успеха в применении моделирования к решению задач молниезащиты были сделаны относительно недавно. В качестве примера можно привести применение модели термической плазмы для исследования процесса взаимодействия молнии и фюзеляжа самолёта, описанное в [2]. Результаты, полученные в этой и в более поздних публикациях, были впоследствии использованы при разработке модели искрового разряда, использовавшейся для анализа протекания тока молнии через РМК [5], [6],

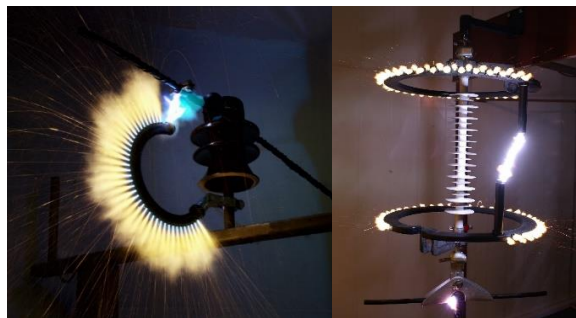


Рис.1. РМК во время испытаний в высоковольтной лаборатории

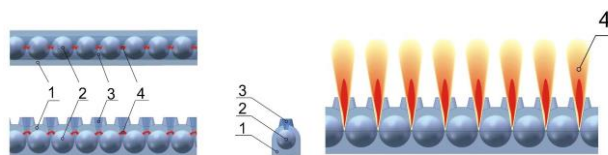


Рис.2. МКС: слева – фаза пробоя, справа – формирование плазменной струи. 1 – силиконовая резина, 2 – стальной электрод, 3 – споло, 4 – канал дуги

[7], [9]. Последующая работа в этом направлении позволила сформулировать подход к моделированию гашения дуги и разработать методику оценки отключающей способности РМК [8]. Наша работа представляет из себя попытку развития идей, заложенных в работах предшественников, в данной статье мы обсудим возможность применения моделирования для оценки перспективности тех или иных технических решений при разработке новых конструкций РМК и представим первые результаты подобных оценок. Статья поделена на четыре части. В первой части приведено краткое описание устройства и принципа работы РМК. Следующая часть посвящена математической модели разряда в РМК. Далее демонстрируются результаты, полученные с помощью численного моделирования. Заключительная часть посвящена обсуждению полученных результатов и формированию выводов.

II. РАЗРЯДНИКИ МУЛЬТИКАМЕРНОГО ТИПА

A. Устройство и принцип работы РМК

Основным элементом конструкции РМК (см.Рис.1) является система электродов, расположенная в профиле из силиконовой резины [3]. Специально просверленные в профиле каналы вместе с электродами формируют мультикамерную систему (МКС), изображённую на Рис.2. При установке на воздушную линию (ВЛ) РМК соединяется с изолятором параллельно. Специально подобранное расположение электродов в РМК позволяет добиться более низкой, чем у изолятора, электрической прочности, поэтому в случае грозового перенапряжения путь разряда пройдёт не по поверхности изолятора, а внутри разрядника. Последовательный пробой искровых промежутков формирует проводящий канал, через который потекут одновременно ток молнии и ток сети. Вызванный омическим нагревом скачок давления и сила Лоренца станут причиной интенсивного истечения плазмы из разрядных камер РМК в открытое

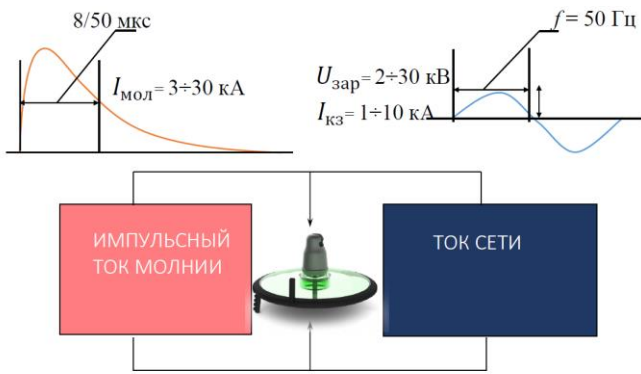


Рис. 3. Принципиальная схема испытания РМК

пространство и диссипации энергии разряда, что в итоге приведёт к затуханию дуги и восстановлению электрической прочности. Для имитации условий грозового перенапряжения на линии в лаборатории используют комбинацию из генератора импульсов тока и колебательного контура (см.Рис.3). Как было выявлено в ходе таких экспериментов в высоковольтной лаборатории, отключающая способность РМК сильно зависит от конструкции разрядной камеры. К сожалению, поиск наилучшего варианта конструкции РК исключительно эмпирическим методом затруднён сложностью эксперимента и высокой стоимостью производства прототипов, в связи с чем видится перспективным применение численного моделирования.

В. Режимы гашения дуги

На ранних этапах разработки предполагалось, что процесс прерывания тока короткого замыкания с помощью РМК будет осуществляться с помощью так называемого Гашения в Нуле (ГН) [3]; в рамках такого подхода сопровождающий ток протекает через устройство в течение полупериода промышленной частоты и обрывается вблизи нуля с последующим восстановлением электрической прочности (Рис.4). Здесь прослеживается прямая аналогия с гашением дуги в выключателях переменного тока, в случае которых такой подход используется давно и успешно. Несмотря на надёжность, у ГН есть очевидные недостатки: при увеличении амплитуды сопровождающего тока усиливается эрозия электродов, что приводит к снижению отключающей способности и ограничивает область применения РМК. Однако позднее был выявлен альтернативный режим гашения, при котором

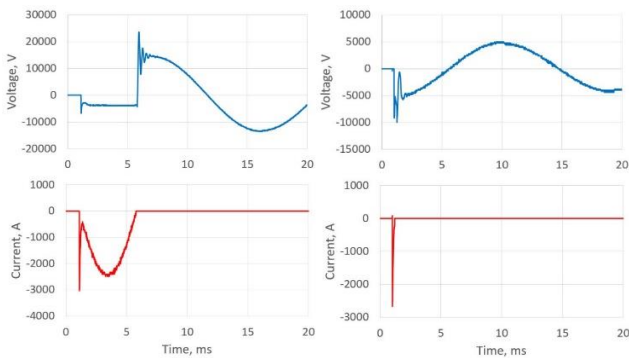


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения РМК для гашения в двух режимах: ГН – слева, ГИ – справа

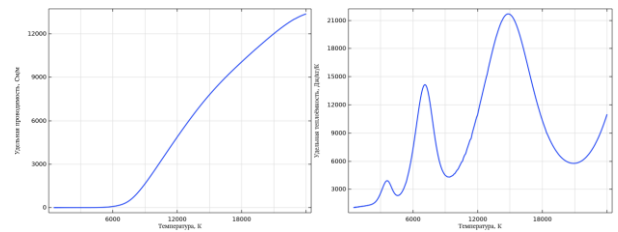


Рис. 5. Температурные зависимости удельной проводимости и теплоёмкости

сопровождающий ток по причине более эффективного охлаждения дуги ограничивается на раннем этапе горения разряда. Таким образом в этом режиме, названном Гашением в Импульсе (ГИ) [4], характерное время процесса гашения дуги соизмеримо с длительностью импульса тока молнии, то есть составляет сотни микросекунд, а не десятки миллисекунд, как в случае ГН. (Рис. 4).

III. МОДЕЛЬ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

Используемая в расчётах модель дугового разряда была подробно описана в других работах, поэтому здесь мы не будем углубляться в детали, а отметим лишь наиболее существенное. Так, в первую очередь стоит упомянуть, что при разработке используемый подход к моделированию опирается на приближение Локального Термодинамического Равновесия (ЛТР), поэтому основой модели является системы уравнений магнитной гидродинамики (МГД).

А. Приближение равновесной дуги

Система уравнений МГД содержит уравнения Навье-Стокса для проводящего сжимаемого газа и уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{u} h) = \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \mathbf{u}) + \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_{rad}) \quad (3)$$

Для замыкания систему (1) - (3) необходимо дополнить уравнением состояния плазмы. Также нужно заранее задать термодинамические и транспортные свойства плазмы как функции давления и температуры. В качестве примера на Рис.5 приведены температурные зависимости удельных проводимости и теплоёмкости.

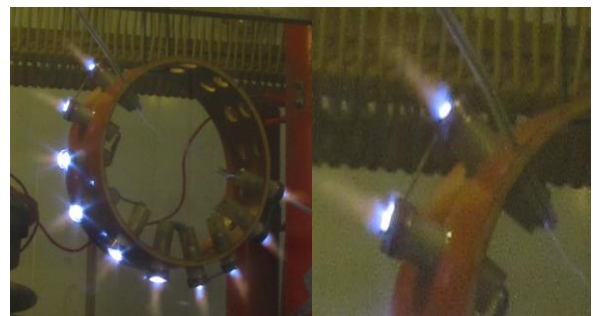


Рис. 6. Прототип нового устройства: слева – РМК, справа – РК

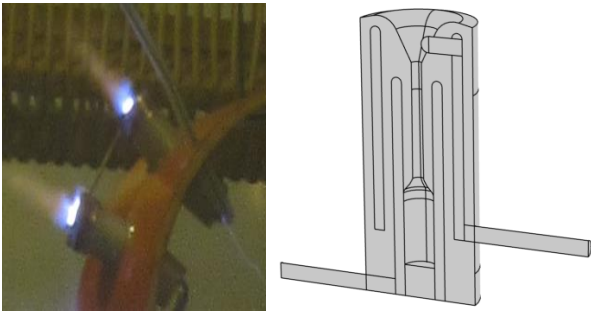


Рис. 7. Конструкция РК (прозрачность)

В. Перенос излучения

Важно отметить, что, так как мы имеем дело с разрядом, поддерживаемым током молнии, то есть, сочень быстро протекающим процессом, наиболее важным механизмом теплопереноса стоит считать излучение. Для наиболее полного описания динамики излучения необходимо дополнить систему (1) - (3) уравнением переноса излучения:

$$s \cdot \nabla I_v(\mathbf{r}, s) = \kappa_v [I_v^b(T) - I_v(\mathbf{r}, s)] \quad (4)$$

,где $I_v(\mathbf{r}, s)$ - интенсивность излучения в направлении s , определяемая в точке \mathbf{r} , а $I_v^b(T)$ - функция Планка:

$$I_v^b(T) = \frac{2h}{c^3} \frac{v^3}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1} \quad (5)$$

При этом важно найти компромисс между точностью расчёта и его трудоёмкостью, так как решение уравнения переноса излучения часто требует значительных вычислительных ресурсов. В работе [8] была предложена относительно простая, но при этом достаточно эффективная расчётная схема, использующая два частотных интервала, низкочастотный и высокочастотный - от 0 до 120 нм и свыше 120 нм. Эта схема была использована и в нашей работе.

С. Моделирование гашения дуги

Для учёта взаимодействия разрядника с сетью

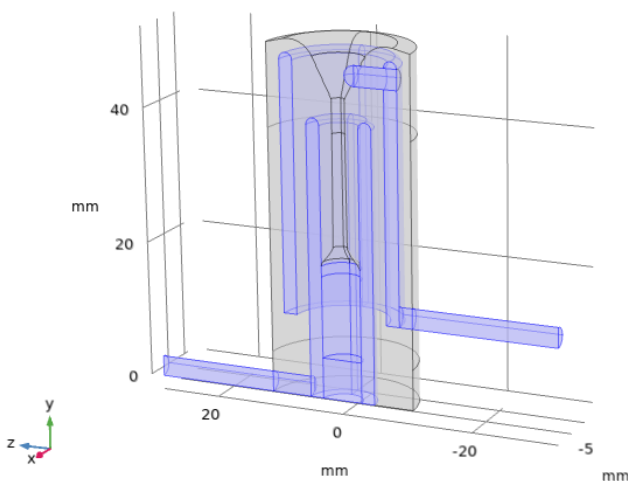


Рис. 8. Конструкция РК

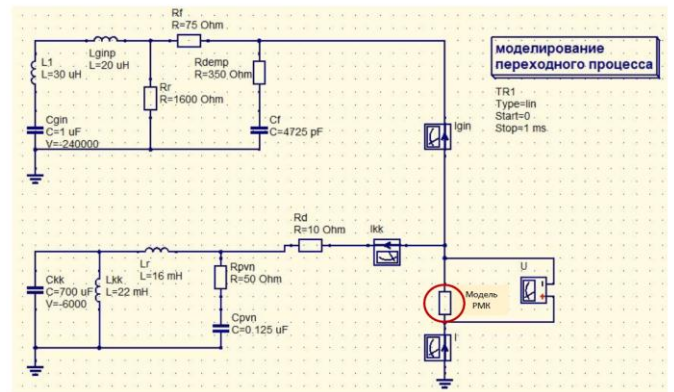


Рис. 9. Электрическая схема экспериментального стенда для проведения испытаний РМК

необходимо добавить уравнения электрического контура испытательной схемы, описывающие переходной процесс при грозовом перенапряжении.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанный метод моделирования был применён для исследования устройства нового типа, рассчитанного на работу в режиме ГИ. Основная задача исследования заключалась в определении точности, с которой расчётная методика позволяет оценивать отключающую способность РМК.

А. Прототип нового РМК

Изображение прототипа устройства и увеличенное изображение разрядного элемента представлены на Рис. 5. Всего РМК содержит 8 камер, трёхмерная модель камеры представлена на Рис. 6. Каждая камера состоит из сопла, выполненного из силиконовой резины, и расположенных внутри сопла двух соосных стальных цилиндрических электродов с отводами для соединения с соседними камерами (см. Рис.7, проводящие части РК выделены фиолетовым цветом). Электроды изолированы друг от друга слоем резины. Внешний цилиндр дополнен электродом из вольфрама, выступающим из силиконовой резины. В случае грозового перенапряжения этот электрод будет инициировать стримерный разряд, замыкающий воздушный промежуток между

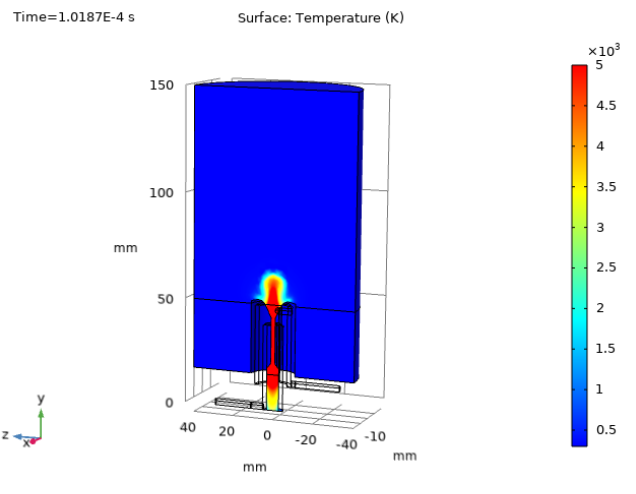


Рис. 10. Результаты расчёта распределения температуры в РК.

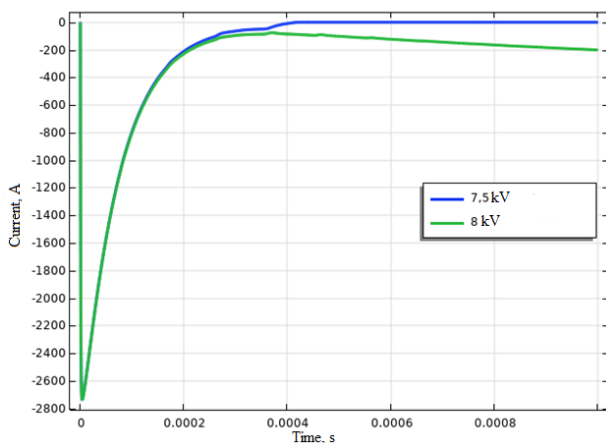


Рис. 11. Результаты расчёта тока через РМК для двух зарядных напряжений: 7.5 кВ и 8 кВ.

цилиндрами. Также в РК присутствует дополнительная полость, так называемая напорная камера, чьё назначение состоит в повышении интенсивности охлаждения дуги за счёт эффекта обратного дутья.

В. Оценка отключающей способности РМК

Для валидации разработанной модели был проведён численный эксперимент, отражающий условия реальных опытов. Схема испытательной установка представлена на Рис.8, используемые параметры схемы позволяют подавать на испытуемый объект импульс тока с максимальным значением до 3 кА. Изменяя зарядное напряжение на конденсаторе колебательного контура, можно изменять амплитуду сопровождающего тока. Увеличивая амплитуду вплоть до перехода от ГН до ГИ, то есть, до того момента, когда появятся условия для протекания сопровождающего тока в течение полупериода, можно определить отключающую способность разрядника. В моделировании использовался аналогичный подход, в результате было определено граничное значение зарядного напряжения, при превышении которого происходит переход от ГИ к ГН. При расчёте истечения плазмы из камеры учитывалась симметрия конструкции относительно плоскости, проходящей через ось сопла и оси электродов, что позволяет рассматривать только половину камеры. На одном из электродов задавался полный ток, определяемый переходным процессом в электрической схеме, другой электрод был заземлён.

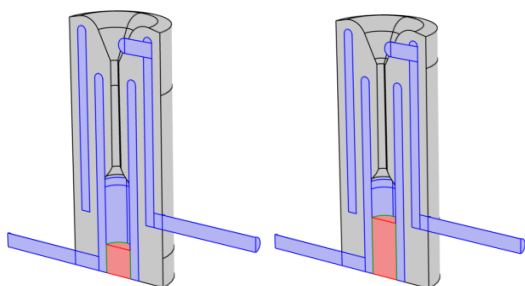


Рис. 12. Конструкции РК с разными объёмами напорной камеры. Красным выделена металлическая пробка: слева – высота металлической пробки – 6 мм, справа – 12 мм

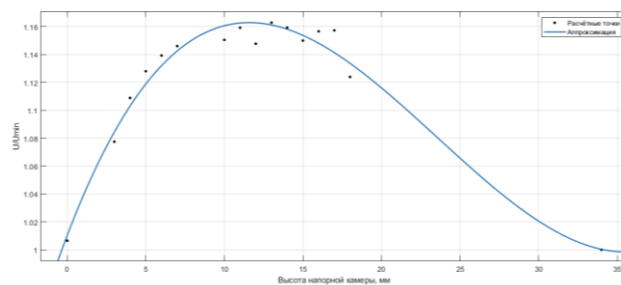


Рис. 13. Зависимость остаточного напряжения от высоты напорной камеры

Пример результатов расчёта приведён на Рис. 9, здесь представлено распределение температуры в РК. На Рис.10: представлены две временные зависимости тока, рассчитанные для двух разных зарядных напряжений – 7.5 кВ (синий цвет) и 8 кВ (зелёный цвет). Можно заметить, что в случае 7.5 кВ примерно после 400 мкс ток уходит в ноль, в то время, как в случае 8 кВ ток начинает вновь нарастать, то есть сопровождающий ток «подхватывается». Таким образом расчётная отключающая способность разрядника составляет 7.5 кВ, в то время как значение, полученное при проведении натуральных испытаний, составило 8 кВ.

С. Расчёт оптимального объёма напорной камеры

Одним из ключевых параметров конструкции РК является объём напорной камеры – дополнительной полости, расположенной под соплом. Объём напорной камеры определяется размером специальной металлической пробки, помещаемой снизу. На Рис.11 два варианта конструкции с высотой пробки 6 мм и 12 мм, пробка выделена красным цветом. Как уже упоминалось, добавление напорной камеры должно увеличивать скорость охлаждения дуги, формируя обратное течение холодного газа, при этом возникает вопрос, при каком объёме напорной камеры удастся добиться максимального эффекта. Исходя из общих соображений следует предположить наличие значение в промежутке между вырожденными случаями – отсутствием напорной камеры и напорной камерой с бесконечным объёмом (открытая камера без пробки). Определение такого значения опытным путём представляется проблематичным в связи с необходимостью проводить большое число испытаний, поэтому выбор был сделан в пользу моделирования. Для ускорения расчётов вместо отключающей способности рассчитывалось остающееся напряжение при протекании тока молнии через разрядник. Полученная расчётная зависимость остаточного напряжения от объёма напорной камеры (размера пробки) представлена на Рис.12. Как и видно из графика, оптимальное значение объёма напорной камеры действительно существует, эффективность гашения соответствующей конструкции должна быть выше на 16%, чем у исходной.

V. ВЫВОДЫ

Применение численного моделирования позволяет получать достаточно точные оценки отключающей

способности РМК и может успешно использоваться для проектирования новых перспективных устройств.

ССЫЛКИ

- [1] A.Gliezes, J. Gonzales, P. Freton "Thermal plasma modeling" Journal of Physics D: Applied Physics, v.38, n.9
- [2] F.Wang, X.Ma, H. Chen, Y.Zhang "Evolution simulation of lightning discharge based on a magnetohydrodynamics method" Plasma Science and Technology, v.20, n.7
- [3] G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V.E. Pilshikov, A. D. Sivaev "Overhead Lines Lightning Protection by Multi-chamber Arresters and Insulator-arresters ", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, No. 1, pp.214-221, January 2011.
- [4] G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin "Multi-Chamber Disc-Type Lightning Arrester for Medium Voltage Overhead Lines", 35th International Conference on Lightning Protection, 20-26 September 2021 - Sri Lanka.
- [5] V.Ya.Frolov, D.Y.Ivanov, Yu.V.Murashov, A.D.Sivaev "Calculation of composition of plasma of an arc pulsed discharge in a multi-chamber arrester" Technical Physics Letters vol.41pp. 301-313(2015)
- [6] V.Ya.Frolov, D.Y.Ivanov, G.V.Podporkin, A.D.Sivaev "Development of mathematical model of processes in multi-chamber arrester for identification of criteria of arc extinction" International symposium on lightning protection (XIV SIPDA).
- [7] V.Ya.Frolov, D.Y.Ivanov, Yu.V.Murashov, A.N.Chusov "Numerical simulation of processes in discharge chamber of multi-chamber arrester for lightning protection" Proceedings of V Russian Conference on Lightning Protection, pp.334-337, 2016
- [8] M.Muermann, A.Chusov, R.Fuchs, A.Nefedov, H.Nordborg "Modeling and simulation of the current quenching behaviour of a line lightning protection device" Journal of Physics D: Applied Physics, v.50, n.10
- [9] V.Ya.Frolov, D.Y.Ivanov, G.V.Podporkin, A.D.Sivaev "Development of two-temperature mathematical model of processes in discharge chamber of multi-chamber arrester operating in conditions of mountainous areas" Plasma Physics and Technology 6(2):135-139, 2019
- [10] A.V. Budin, M.E. Pinchuk, V.E. Pilschikov, A.G. Leks, V.V. Leont'ev "Experimental stand for investigations of protective device for overhead power lines" 2016 Instruments and Experimental Techniques