

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Высшая школа высоковольтной энергетики

Работа допущена к защите

Директор высшей школы

_____ В.О. Белько

« ____ » _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ОТБОР МОЩНОСТИ ВЛ ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ СВЕТОВОЙ МАРКИРОВКИ ПРОВОДОВ

по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

по образовательной программе

13.03.02_07 Высоковольтные электроэнергетика и электротехника

Выполнил

студент гр.3231302/70701

Г.С. Астафьев

Руководитель

Профессор, д.т.н.

В.В. Титков

Консультант

по нормоконтролю

А.С. Резник

Санкт-Петербург

2021

6. Консультанты по работе: Волошин К.В., аспирант

7. Дата выдачи задания: 16.02.2021

Руководитель ВКР _____

(подпись)

В.В. Титков

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 16.02.2021

(дата)

Студент _____

(подпись)

Г.С. Астафьев

инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 53 с., 26 рисунков, 14 таблиц, 1 приложение.

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЛЭП, АВИАЦИЯ, МАРКИРОВКА ПРОВОДОВ,
ЕМКОСТНОЙ ОТБОР МОЩНОСТИ, ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ**

В данной работе, касающейся одной из проблем электроэнергетики, связанной со столкновениями авиационных судов с проводами ЛЭП, был рассмотрен способ снижения рисков подобных аварий. Современное решение связано с использованием средств световой маркировки при помощи газоразрядных ламп. Однако в ходе их эксплуатации была выявлена проблема, связанная с характеристиками свечения, которая решается в данной работе при помощи компьютерного моделирования.

THE ABSTRACT

53 pages, 26 pictures, 14 tables, 1 application

**ELECTRIC POWER INDUSTRY, OVERHEAD POWER TRANSMISSION
LINES, AVIATION, WIRE MARKING, CAPACITIVE POWER TAKE-OFF, GAS
DISCHARGE LAMPS**

In the given work, concerning one of the problems of the electric power industry associated with collisions of aircraft with overhead power transmission lines, a method was considered to reduce the risks of such accidents. The modern solution is associated with the use of light marking with use of gas discharge lamps. However, during their exploitation, a problem was identified, associated with lighting characteristics, which is solved in this work using computer modeling.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор.....	6
Глава 2. Обоснование выбора емкостного отбора мощности для питания устройств маркировки ВЛ.....	17
2.1. Способы питания автономных устройств	17
2.2. Общая специфика отечественных и зарубежных маркировочных ламп	19
2.3. Достоинства и недостатки каждого способа питания автономных устройств ВЛ.....	20
2.4. Выбор способа отбора мощности ВЛ для питания маркировочных ламп на основании эффективности и оптимальности	22
2.5. Заключение о выборе способа питания лампы	23
Глава 3. Моделирование системы ‘провода вл – антенна – лампа – земля’. Влияние емкостей на ток через лампу. Определение параметров системы, влияющих на емкости.	24
3.1. Моделирование системы ‘провода ВЛ – антенна – лампа – земля’.	24
3.2. Влияние емкостей на ток через лампу.	29
3.3. Определение параметров системы, влияющих на емкости и ток	29
Глава 4 – Дизайны антенн и обеспечиваемые ими параметры. Электрический расчет. Учет реальной ВАХ. Аэродинамические характеристики	31
4.1. Дизайны антенн и обеспечиваемые ими параметры	31
4.2. Электрический расчет.....	37
4.3. Учет реальной ВАХ	38
4.4. Аэродинамические характеристики	40
Глава 5. Экономическая часть расчетов	46
Заключение	49
Список использованных источников	51
Приложение 1. Текст программного блока для учета вольт-амперной характеристики газоразрядной лампы	53

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные провода представляют реальную угрозу безопасности полётов судов малой авиации. Маркировка ЛЭП — необходимый элемент комплекса мероприятий по обеспечению безопасности полётов, поскольку расстояния между опорами могут быть значительными, и пилоты могут быть введены в заблуждение о фактической трассе и превышениях высот проводов высокого напряжения.

Согласно требованиям ИКАО и отраслевых стандартов ПАО «РОССЕТИ» «Маркеры для воздушных линий электропередачи» в габаритах ВЛ напряжением 35 кВ и выше необходимо применять на элементах ВЛ, расположенных в районе аэродрома и воздушных трассах, возвышающихся над установленными поверхностями ограничения препятствий, а также объектах расположенных в зонах движения и маневрирования воздушных судов, в зоне полетов малой авиации, при пересечении автодорог категории IA, IB, IV, на больших переходах, и на приаэродромной территории.

Оптимальным вариантом является использование маркировочных газоразрядных ламп, ввиду их надежности и, соответственно, долговечности.

Однако, при проектировании методов отбора мощности для питания маркировочных устройств, инженеры столкнулись с несколькими проблемами. Первая связана с особенностью самих газоразрядных ламп, используемых для маркировки ВЛ на данный момент. При использовании метода электростатического отбора мощности от ВЛ (емкостного) приходилось использовать большое балластное сопротивление для стабилизации напряжения, что увеличивало массу устройства, вызывало дополнительные потери энергии на резисторе, а помещение этого сопротивления внутрь лампы вызывало повышение рабочей температуры осветительного прибора, что в конечном счете, обязательно вело к снижению срока службы. Но, первую проблему инженерам удалось решить техническим путем. Манипулируя такими

параметрами лампы, как: площадь ее электродов, состав газовой смеси, масса и габариты, была достигнута общая цель – отсутствие балластного сопротивления в устройстве, что снизило массо-габаритные показатели устройства, устойчивое горение при меньшем рабочем токе, снижение плотности тока через электроды, что увеличивает срок жизни лампы, уменьшение геометрических размеров устройства.

Вторая проблема связана непосредственно с устройством для отбора мощности ВЛ – антенной. Обычная антенна представляет из себя металлическую проводящую трубу, подвешенную параллельно фазному проводу. При испытаниях упомянутых выше маркировочных ламп на наших ВЛ, было замечено, что на ВЛ класса напряжения 110 кВ интенсивность свечения, яркость, демонстрируемые установленными маркировочными лампами, могут не достигать до рекомендуемых параметров. Отсюда и следует цель и тема работы: необходимо решить проблемы, связанные с низким уровнем питания, а именно – исследовать различные параметры антенн и найти эффективный, конструктивно простой и надежный вариант для емкостного отбора мощности ВЛ.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Необходимость в световой маркировке проводов ЛЭП легко заметить, если рассмотреть статистику аварий с участием ВЛ и различными воздушными судами. Для разъяснения данного вопроса обратимся к документу [1]. В нем приводится следующая статистика:

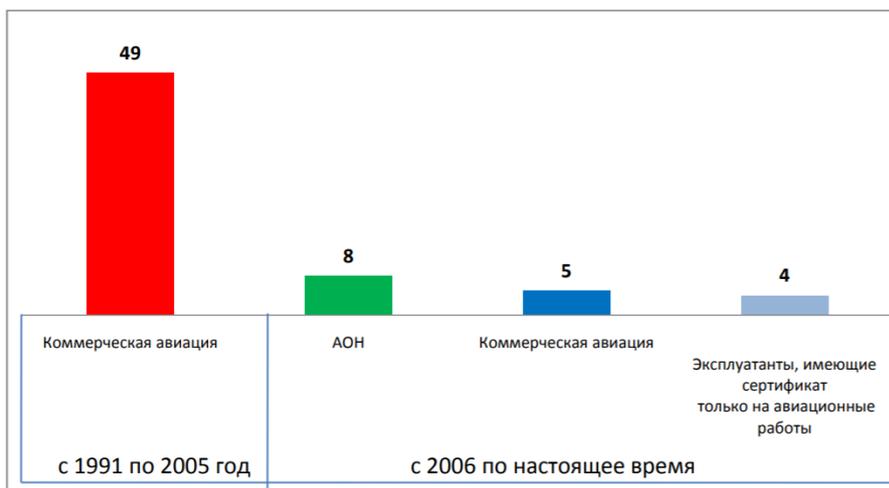


Рис. 1.1. Распределение авиационных событий, связанных со столкновением с ЛЭП, по видам эксплуатантов гражданской авиации за период с 1991 по май 2013 года

Конечно, можно заметить заметное снижение количества подобных инцидентов, однако количество аварий все равно является неудовлетворительным. За период с 1991 года по май 2013 года в происшествиях, связанных со столкновением судов гражданской авиации, судя по документу, погибло 52 человека. Большая часть аварий, при этом, произошла в европейской части Российской Федерации, где плотность полетов всех типов – коммерческих, транспортных, учебных, рабочих, развлекательных особо велика. С 2002 года почти все аварийные полеты производились в простых метеоусловиях при хорошей видимости (19 из 20), что доказывает случайность данных происшествий.

При этом столкновения происходили на следующих этапах маневрирования:

- заход на посадку и посадка – 32%;
- полет по маршруту на малой высоте – 29%;
- взлет и начальный набор высоты – 22%;
- полет над обрабатываемым участком – 17%.

Стоит отметить, что в ночное время суток столкновения с ЛЭП не происходили.

После расследования данных происшествий комиссия выявила несколько причин подобных событий:

- недостаточная осмотрительность в полете на малой высоте;
- недостаточно полное изучение района полетов;
- выполнение полета на высоте ниже безопасной;
- отсутствие на воздушных линиях электропередачи дневной маркировки.

Таким образом, тема работы связана с одной из самых важных причин аварий.

После исследования и систематизации подобных аварий, Росавиация разработала поправки в законодательную базу, регулирующую проектирование аэродромов, взлетных площадок и прилегающих территорий. Основные требования можно сформулировать подобным образом: для обеспечения безопасности полетов воздушных судов, на опорах воздушных линий электропередачи, расположенных в районе аэродрома, в радиусе 5 км от центра посадочной площадки, должна быть предусмотрена маркировка. Она предусматривается на опорах и проводах воздушных линий электропередачи, выступающих за внутреннюю горизонтальную, коническую или переходную

поверхность, поверхность взлета или поверхность захода на посадку в пределах 6000 м от их внутренних границ (в радиусе 5 км от центра посадочной площадки). На опорах воздушных линий электропередачи высотой 100 м и более и на их проводах, независимо от места их расположения, тоже должна быть предусмотрена дневная маркировка.

Для решения описанной выше проблемы обратимся к международному стандарту ИКАО, а именно к документу [2]. Данный стандарт предполагает использование световой дневной и ночной маркировки, которая удовлетворяет двум требованиям: увеличивает визуальную заметность габаритов строений (ЛЭП в частности) и является мало заметной с земли, то есть не ухудшая внешний вид конструкций, при этом выполняя свою основную функцию.

Исходя из документа, световая маркировка может, в зависимости от требований и обстоятельств, может быть представлена в трех категориях интенсивности: огни малой, средней и высокой интенсивности. Огни таких систем излучают либо белый, либо красный свет. По наблюдениям пилотов, требуемая частота повторения импульсов должна быть в диапазоне от 60 до 120 в минуту, что позволит отслеживать маркер и быть ему хорошо заметным. Использование частоты ниже указанного выше диапазона грозит тем, что пилот, возможно, не сможет сконцентрироваться на маркере, или, еще хуже, потеряет его из виду, что критично ввиду того, что поле зрения пилота постоянно меняется. И наоборот, превышение частоты выше предложенного диапазона ведет к тому, что зрение наблюдателя будет раздражено слишком часто повторяющимся сигналом.

Чтобы давать преимущество в заметности, дальность видимости огня должна быть выше дальность видимости неподсвеченного объекта, так как она почти всегда ниже метеорологической видимости. Для ламп различной степени интенсивности, была замерена зависимость дальности видимости излучения от дальности видимости неподсвеченного объекта. Наблюдение проводилось в

дневное время, когда размещенную на объекте лампу сложнее всего обнаружить. На графике ниже представлена эта зависимость.

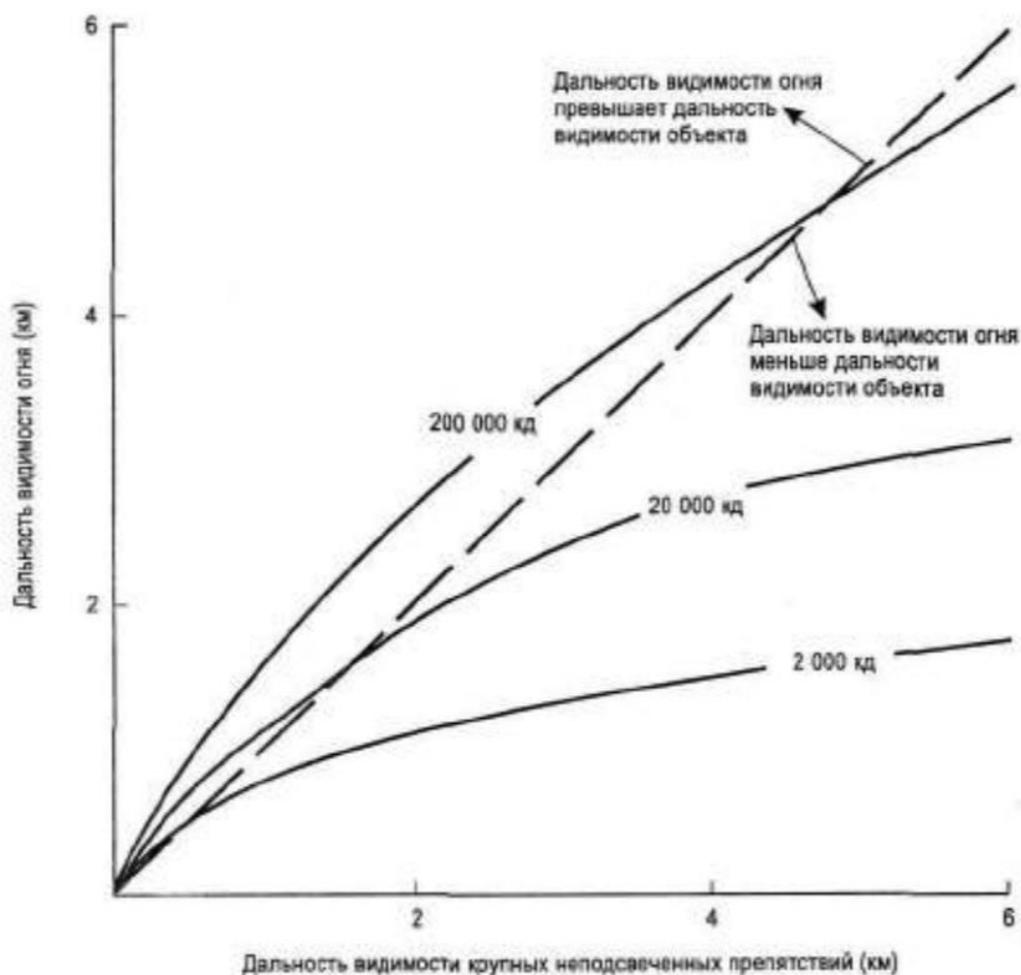


Рис. 1.2. Сравнение типовых характеристик видимости в дневное время

Также указывается, что использование световой маркировки является более приемлемым вариантом, ввиду дороговизны окраски, необходимости постоянно обслуживать ее, невозможности выполнять свою функцию в ночное время суток. Самым оптимальным вариантом является световая подсветка низкой и средней интенсивности. Они недорогие, экономные, более энергоэффективные. Однако, при определенных требованиях, необходимо сделать выбор в пользу ламп высокой интенсивности. Такие лампы устанавливаются непосредственно на опоры ЛЭП. Располагаются он и в три уровня: верхний, средний, и нижний огонь. Верхний располагается на вершине

конструкции опоры ЛЭП, высота нижнего соответствует максимальной высоте провиса провода. Средний огонь установлен посередине между верхним и нижним. Также желательно устроить поочередное загорание огней: средние загораются первыми, верхние – вторыми, самый нижний огонь – последним. При данной установке на провода вешаются маркеры. На каждом уровне (нижнем, среднем и верхнем) необходимо устанавливать 2 и более огней для того, чтобы создавалась зона распространения света в 180 градусов с центром вдоль ЛЭП. Таким образом, пилот будет осведомлен о геометрических параметрах возможного препятствия и сможет или избежать аварии, заранее заметив огни и маркеры, или уклониться от столкновения. Ниже приведен пример такой световой маркировки.

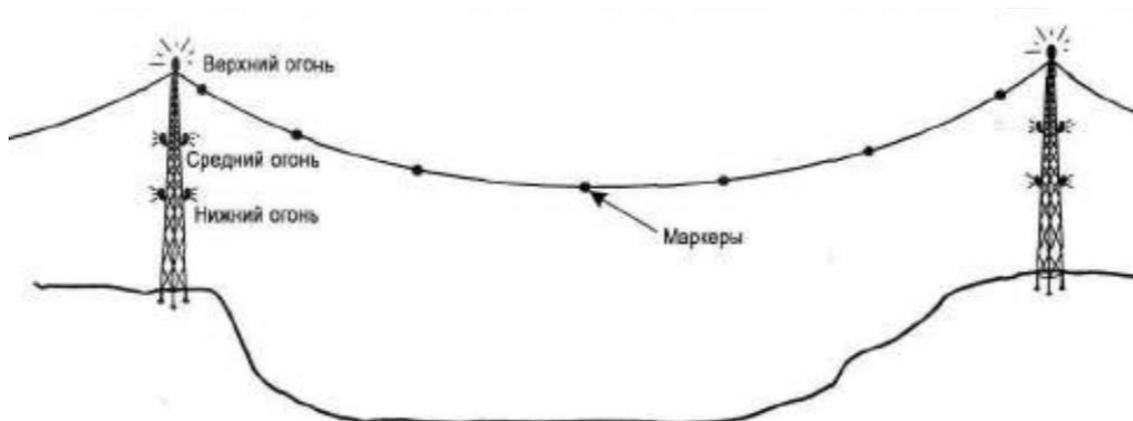


Рис. 1.3. Размещение заградительных огней высокой интенсивности на опорах подвесной ЛЭП.

Однако, самую серьезную опасность для воздушных судов, летящих на малой высоте, представляют именно провода ЛЭП ввиду того, что зачастую расстояние между двумя соседними опорами может быть весьма велико. Поэтому для их маркировки используются лампы, расположенные непосредственно на фазных проводах ЛЭП.

Такие огни являются огнями низкой или средне интенсивности, что создает сложности при их монтаже на проводах. Если напряжение, ток на проводе велики, то возникнет необходимость в организации изолирования и

трансформации тока. Если мы говорим про низковольтные устройства, то затраты на вышеуказанные мероприятия окажутся весьма высоки. Поэтому была разработана следующая система заградительных огней: источник света и проводник (антенна), за счет размещения которого и происходит питание источника света.

Источник света представляет из себя неоновую газоразрядную лампу с низким давлением, излучающую красный свет малой интенсивности. Она имеет длину порядка нескольких (1-4 метра), диаметр трубки из укрепленного стекла порядка 50-60 мм. Лампа подвешивается на специальных крепежных элементах, при этом один конец соединен с фазным проводом, а другой – к антенне. Вся конструкция герметична.

Вспомогательный проводник (антенна) – металлический проводящий провод или труба, изолированный от фазного провода при помощи 2 и более стеклянных подвесных изоляторов, обладающих хорошими изоляционными характеристиками и высокой механической прочностью. Длина антенны варьируется в зависимости от класса напряжения линии, например: 3 м для линий 500 кВ и 10 м для линий 110 кВ. Имеем обратно-пропорциональную зависимость.

Особенность ее работы заключается в том, что разряд внутри лампы загорается при напряжении в несколько кВ, а ее рабочий ток составляет несколько мА. В источник ее питания в данном случае идеально вписывается устройство емкостного, электростатического отбора.

В общем случае элементы заградительного огня будут расположены, как показано на рисунке ниже.

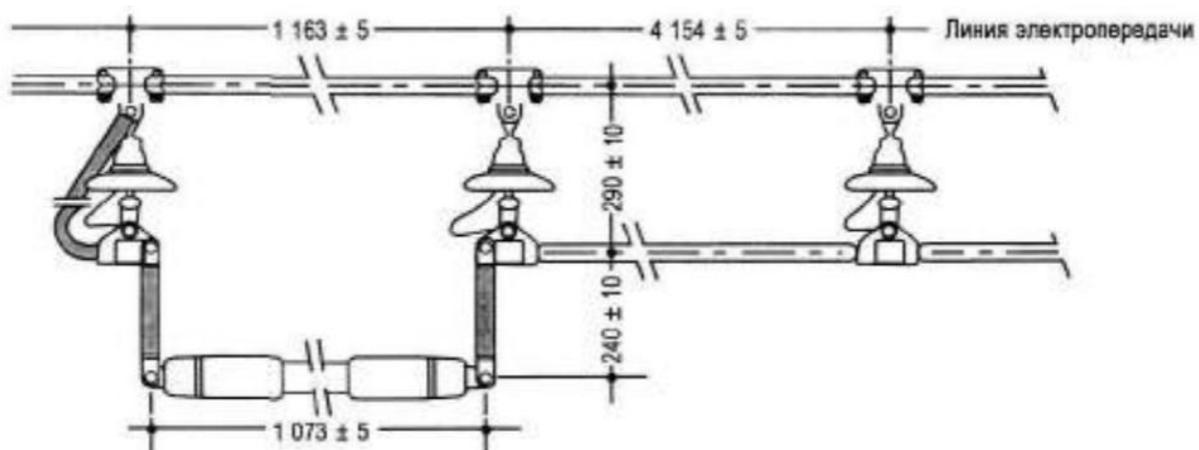


Рис. 1.4. Схема расположения лампы и антенны на фазном проводе

Также стандарт гласит, что техническое состояние системы лампа-антенна должно постоянно контролироваться путем использования автоматических систем контроля или регулярного обхода с визуальным анализом, а ее конструкция должна быть простой, не требовать постоянного обслуживания и сохранять свои характеристики, прежде всего, световые, в течение минимум одного года после начала эксплуатации.

Теперь обратимся к стандарту [3]. Так как в ходе работы мы будем рассматривать отечественную газоразрядную лампу, а не французский аналог, имеющий сравнительно большие недостатки перед отечественным продуктом, для обзора возьмем технические данные из [4] и изучим основные требования стандарта, касающегося именно газоразрядных ламп, просмотрев результаты испытаний, приведенные в статье [5].

Рассмотрим самые главные пункты и определим, какие испытания необходимы и какие требования ставятся перед системами световой маркировки.

- Устройства световой маркировки должны производиться для УХЛ климата, с учетом нахождения на открытом воздухе. Они должны быть надежными и долговечными, выдерживать климатические, механические, ветровые и токовые нагрузки.

- В течение всего срока эксплуатации устройство световой маркировки (далее УСМ) без разрушения и утраты показателей должно обеспечивать свечение со следующими характеристиками: интенсивность – не менее 10 Кд; красный цвет свечения, попадающий в красную цветовую область, определяемую колористической системой МКО от 1931 года; должны быть отчетливо видны под разными углами

Таблица 1.1.

Координаты цветности угловых точек цветовых областей (сверху x, снизу y).

Цвет	Координаты			
Красный	1	2	3	4
	0.569	0.655	0.690	0.595
	0.341	0.345	0.310	0.315

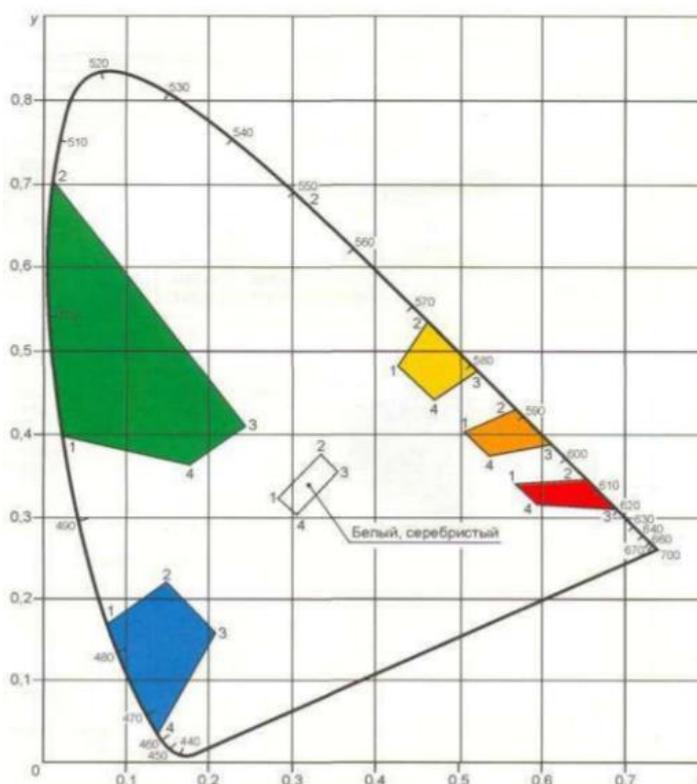


Рис. 1.5. График цветных областей

- Не должны создавать радиопомехи
- Отсутствие короны при наибольшем рабочем напряжении
- УСМ должны выдерживать полный и срезанный грозовой импульс согласно [7]
- Срок службы должен быть не менее 40 лет

Пилотные образцы находятся в опытной эксплуатации на ВЛ 330 кВ Копорская-Пулковская МРСК Северо-запада с октября 2018 года, а с тех пор не наблюдалось никаких проблем с функционированием данных устройств.

Что касается лабораторных испытаний, то, согласно [5], было проведено несколько исследований опытного образца.

Температурный расчет показал, что при температуре окружающей среды, взятой равной 40 градусам, что выше максимальной для умеренного климата, характерного для центральной части России, эксплуатационная температура не превышает максимальную рабочую, заданную в [3] (130 градусов). Модель для расчета и распределение представлено на Рис.6 ниже.

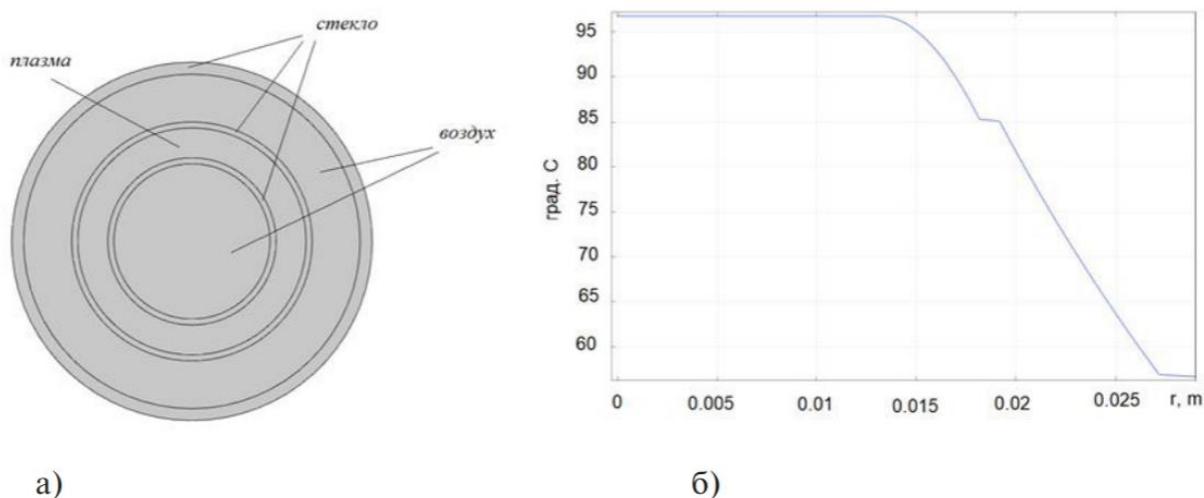


Рис. 1.6. Температурный режим лампы: а) Расчетная модель б) Распределение температуры элементов лампы по радиусу

Красный цвет освещения, который регламентируется в [3], также был воспроизведен с большой точностью. Для оценки использовался лабораторный спектральный анализ. Данные сопоставились с цветовым стандартом МАК с координатами МК-31. Ниже на Рис. 7 представлены результаты этого исследования

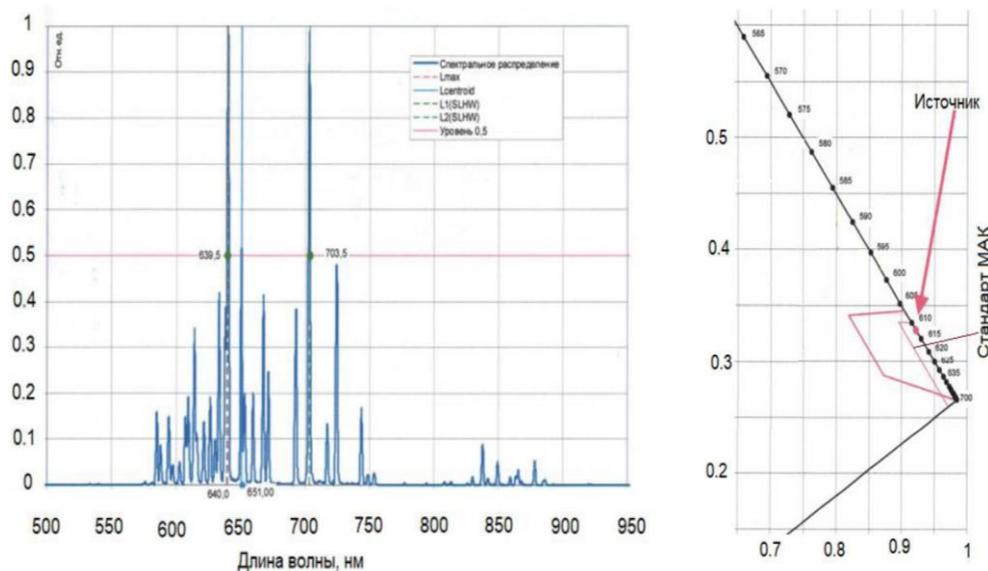


Рис. 1.7. Спектральное распределение лампы

По изображению выше, что спектр излучения лампы соответствует нужному красному.

Исследования на электрическую корону показали, что оптимальной высотой подвеса (вертикальное расстояние между фазным проводом и антенной), при которой отсутствует корона, является высота от 0.4 до 0.7 метра. Также используются противокоронирующие элементы крепления, установленные на конце антенны.

Также, важным моментом является рассмотрение влияние стандартного грозового импульса на состояние конструкции. Для решения этого вопроса было установлено напряжение, передающееся на лампу, при воздействии грозового импульса амплитудой в 1300 кВ, высчитанное и равное 48 кВ. Эксперимент был проведен для лампы, которая должна быть расположена на

ЛЭП 330 кВ. Суммарная емкость системы антенна – провода ВЛ составляет 235 пФ. Таким образом, используя ГИН и зная параметр замещения был проведен эксперимент. Согласно данным из [5], после серии из 100 последовательных приложенных импульсов характеристики лампы – напряжение зажигания дуги в лампе, световые характеристики не изменились.

Серия данных экспериментов позволяет с большой уверенностью заключить, что лампа удовлетворяет требованиям стандартов, и ее эксплуатация будет успешной.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЕМКОСТНОГО ОТБОРА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ МАРКИРОВКИ ВЛ

После понятия о необходимости и критической важности внедрения маркировочных устройств на ЛЭП и их провода, встает вопрос: стоит ли придерживаться нынешнего способа отбора мощности с проводов ВЛ? Есть ли достойные альтернативы текущему емкостному отбору мощности? Ниже рассмотрим этот вопрос.

Электроснабжение автономных устройств ВЛ довольно вариативно, но с развитием технологий и разработкой новых устройств, появляется потребность в нахождении оптимального метода для отбора мощности ВЛ. Потому мы поставим цель: найти способ, отвечающий следующим требованиям: малые габариты, масса; достаточный объем отдаваемой мощности; независимость от режима работы сети; высокий – порядка 5 кВ уровень генерируемого напряжения при токе в 5-10 мА.

Рассмотрим каждый теоретически возможный способ отбора мощности для питания автономных устройств ВЛ, коей является газоразрядная маркировочная лампа.

2.1. Способы питания автономных устройств

2.1.1. Емкостной (Электростатический отбор)

Рассмотрим устройство для отпугивания птиц, описанное в патенте [8]. Для питания автономного отпугивателя в нем используются два способа отбора мощности ВЛ – электромагнитный и емкостной. В этом пункте будет рассмотрен электростатический способ.

Данный отбор мощности функционирует за счет помещения дополнительного проводника в пределах действия электрического поля фазного провода. Дополнительный проводник именуется антенной, патент предлагает использование либо прямой антенны, либо спиральной. Отбор происходит из-за

образования электрического так называемого ‘плавающего потенциала’.

Наведенная энергия напрямую зависит от величины емкости, образованной между отдельными элементами системы (емкость между антенной и фазными проводами, емкость антенны на землю и прочие). При выполнении определенных условий система накапливает заряд, достаточный для питания устройства. В данном устройстве используется для питания в условиях отсутствия потребления мощности потребителями. Электростатический отбор позволяет сохранять постоянным уровень собираемой мощности, об этом заявляет один из производителей конструкций для емкостного отбора мощности на интернет-ресурсе [9], что для маркировочных ламп является обязательным требованием.

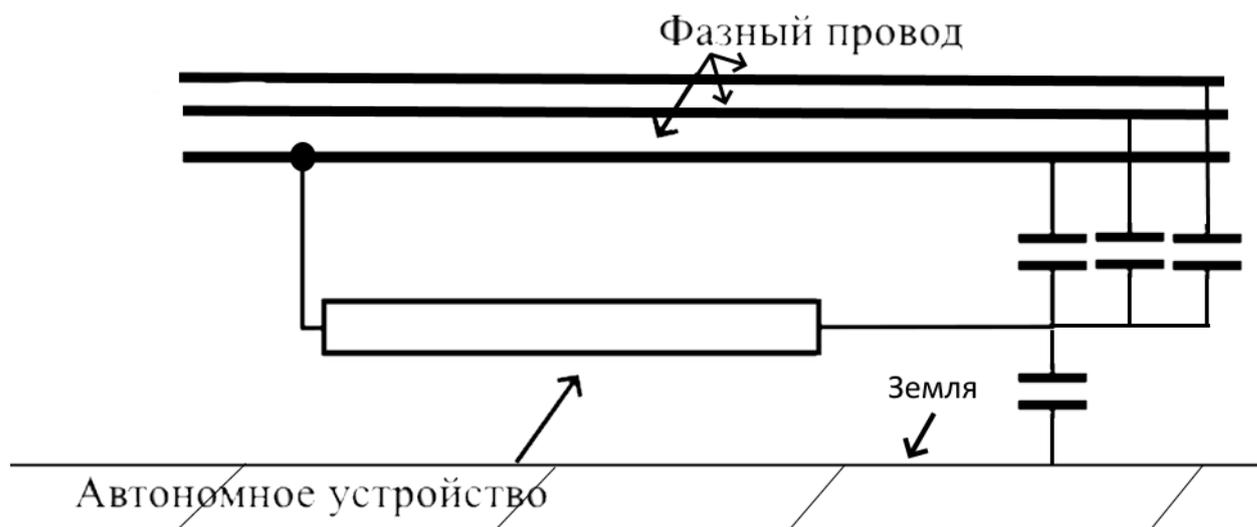


Рис. 2.1.1.1. Схема организации емкостного отбора

2.1.2. Электромагнитный отбор

В устройстве, представленном в патенте [8], конструктивно предусмотрен также и электромагнитный источник питания. Питание в электромагнитном случае происходит за счет образования электромагнитной связи между полем провода, и вторичной обмоткой устройства. Таким образом, такое устройство по отбору мощности является, по сути, трансформатором тока.

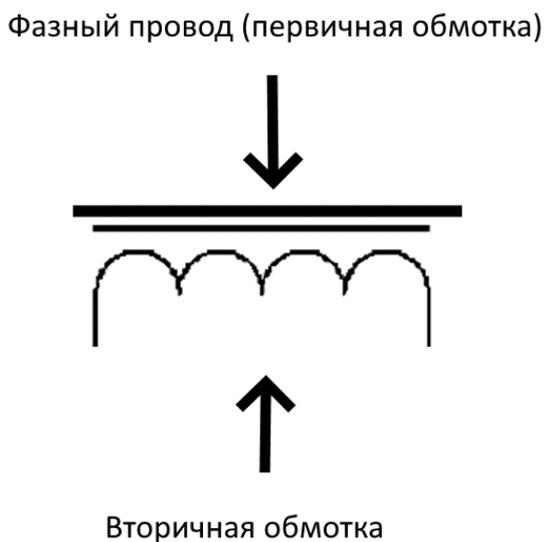


Рис. 2.1.2.1. Схема электромагнитного отбора

2.1.3. Химические источники энергии

В данном случае предусматривается использование химических источников мощности: расходоуемых батареек и подзаряжаемых аккумуляторов.

2.2. Общая специфика отечественных и зарубежных маркировочных ламп

И отечественные, и зарубежные образцы маркировочных ламп обладают рядом схожих требований, обусловленных их физическими и техническими свойствами, а также требованиями стандартов и прочих нормирующих документов. Для определения оптимального способа отбора мощности приведем их ниже:

- Относительно высокое рабочее напряжение (до 5 кВ), что связано с особенностью разряда в используемых газоразрядных лампах
- Необходимость постоянства величины приложенного напряжения и тока: при низком токе, протекающем через фазный провод, интенсивность свечения лампы резко снижается и может не укладываться в нормативные и заданные показатели). При переменной нагрузке показатели свечения так же не будут попадать в приемлемые границы допустимых.

- **Необслуживаемость:** простота конструкции, которая обеспечит бесперебойное и надежное функционирование устройства в течение всего срока годности (вплоть до 50 лет и более).

Из этого следует, что необходимый нам метод питания должен иметь возможность отбора достаточно большой мощности, выдавать ее независимо от показателей тока в фазном проводе, и должен в идеале обслужиться только два раза: в момент монтажа устройства и во время окончания его срока службы в момент демонтажа.

2.3. Достоинства и недостатки каждого способа питания автономных устройств ВЛ

2.3.1. Достоинства и недостатки емкостного отбора

Достоинства:

- Независимость от тока в линии, параметры отбираемой мощности зависят в основном от геометрии системы
- Возможность использования в качестве антенны очень легких материалов, вроде сплавов алюминия, что минимизирует нагрузку устройства на фазный провод
- Значительное уменьшение габаритов с ростом класса напряжения (от 20 м для 35 кВ до 3 м для 500 кВ)
- Низкая вероятность возникновения короны, что выяснено экспериментальным путем

Недостатки:

- Усложненный расчет аэродинамики ввиду того, что антенна подвешивается на некотором расстоянии от фазного провода
- Необходимость оборудования подвеса изоляционными конструкциями (подвесными изоляторами), что увеличивает массу системы

2.3.2. Достоинства и недостатки электромагнитного отбора

Достоинства:

- Возможность менять объем собираемой мощности, не меняя геометрических размеров вторичной обмотки. Это можно достичь, например, за счет увеличения числа витков, при этом увеличивая итоговое потокосцепление, что ведет к росту генерируемой ЭДС; также мы можем использовать ферромагнитные сердечники, что так же скажется на итоговой отобранной мощности.
- Крепление в непосредственной близости к проводу позволит сократить влияние “пляски проводов”. Конструкция, при давлении на нее ветра, будет однородной и будет вести себя как обычный провод.

Недостатки:

- Большой вес при использовании ферромагнитных материалов, что ограничит объем доступной конструкции
- Сильная зависимость от тока, протекающего через фазный провод. Только при постоянстве и большой величине нагрузки ЛЭП данный способ будет генерировать достаточный для питания ламп объем мощности.

2.3.3. Достоинства и недостатки химических источников энергии

Первый и самый очевидный недостаток – это ограниченность емкости батарей. Тем более массово производимые АКБ не рассчитаны на столь высокое выдаваемое напряжение. Также вызывают вопросы показатели массы и габаритов изделия. Поэтому, на самом деле, данный способ в дальнейшем можно и не рассматривать.

2.4. Выбор способа отбора мощности ВЛ для питания маркировочных ламп на основании эффективности и оптимальности

Рассмотрев в общем доступные на данный момент способы отбора мощности, выделив их достоинства и недостатки, можно перейти к цели главы – выбору самого приемлемого во всех смыслах способа. Рассмотрим выполнение требований каждым способом:

- Относительно высокое рабочее напряжение (до 5 кВ)

И электромагнитный и емкостной способ обеспечивают это требование. Меняя общую длину конструкции, мы увеличим предел отбираемой мощности.

- Необходимость постоянства величины приложенного напряжения и тока.
- Выполняется только для Э/С отбора мощности.

Оба способа обеспечивают высокую надежность. Однако, стоит заметить, что Э/С отбор является более предпочтительным. Вариативность в конструкции (различные формы антенн – прямые, прямоугольные, овальные и многие прочие), возможность регулировать высоту подвеса конструкции, что несет и регулирование интенсивности возможных ЧР, и величину собираемой мощности). Важным критерием является возможность максимального минимизирования влияния массы антенны на систему фазный провод – стойка опоры ЛЭП.

2.5. Заключение о выборе способа питания лампы

В множестве проектировочных, аналитических документах для питания автономных устройств, расположенных на ВЛ, в частности маркировочных ламп, используемых для световой маркировки проводов, или в непосредственной близости от них, фигурируют именно электромагнитный отбор мощности и электростатический.

Однако, именно для достижения постоянства отбираемой мощности, ее относительной величины и максимальной простоты конструкции, чаще используются антенны, обеспечивающие емкостной отбор мощности ВЛ. Представляя из себя одну или несколько алюминиевых или стальных труб, в зависимости от аэродинамических требований, они являются простыми, дешевыми и надежными конструкциями для отбора мощности. Поэтому, после сравнительного анализа, для питания автономных устройств маркировки, имеющих свои требования к протекающему току и приложенному напряжению, подходит только электростатический отбор.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ‘ПРОВОДА ВЛ – АНТЕННА – ЛАМПА – ЗЕМЛЯ’. ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТЕЙ НА ТОК ЧЕРЕЗ ЛАМПУ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЕМКОСТИ.

3.1. Моделирование системы ‘провода ВЛ – антенна – лампа – земля’.

Средой для моделирования была выбрана программа MATLAB с установленным модулем Simulink и электротехническими библиотеками, позволяющим моделировать практически любые процессы – от установившихся нормальных режимов до нежелательных по типу режимов короткого замыкания и различных перенапряжений.

Для начала определимся с элементами системы, необходимыми для успешного моделирования процессов в газоразрядной лампе.

Имеем: трехфазную ЛЭП; газоразрядную маркировочную лампу и дополнительный проводник-антенну, подвешенные параллельно одному из фазных проводов. В упрощении представим лампу как высокоомный резистор, а емкостные связи антенна-фазные провода и антенна-земля соответствующие своим фазным проводам. Также нам потребуется схема замещения, с помощью которой мы воссоздадим прототип системы в MATLAB. Эту схему можно найти в статье [5], приведем ее ниже.

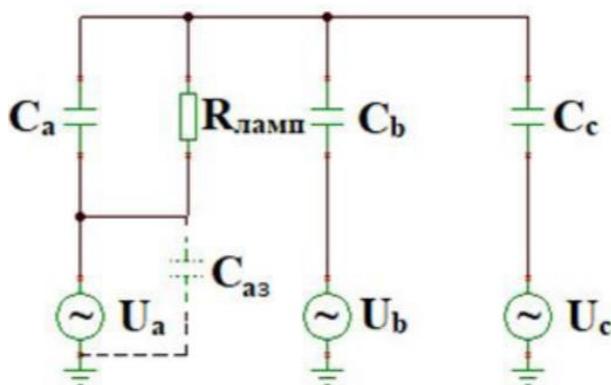


Рис. 3.1.1. Схема замещения автономной системы питания лампы с установкой на фазном проводе

На схеме фазные провода ВЛ заменены источниками переменного напряжения, каждый относится к своей фазе и выдает напряжение равное рабочему фазному (U_a, U_b, U_c). $C_{аз}$ – емкость между антенной и землей, $R_{лампы}$ – сопротивление лампы, которое в данной схеме является активным, что сделано для упрощения расчетов.

$R_{лампы}$ находится по графику линейной зависимости напряжения лампы от тока в цепи как отношение напряжения к току и равно примерно 500 кОм:

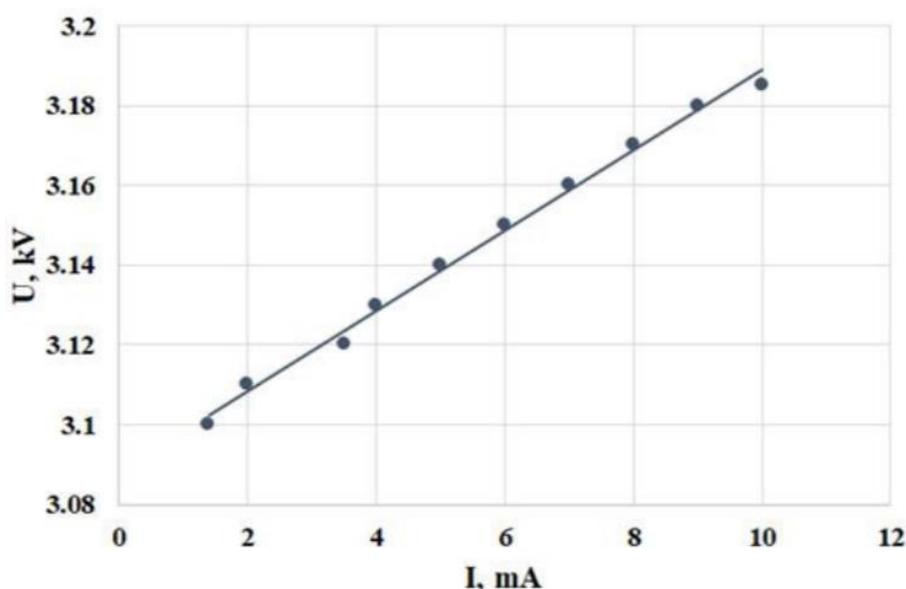


Рис. 3.1.2. Зависимость напряжения на лампе от тока в цепи

Напряжения источников напряжения зависят от класса напряжения рассматриваемой ЛЭП. Мы возьмем линию класса 110 кВ, так как именно на них, как было указано части введения, были при использовании газоразрядных маркировочных ламп замечены недостаточная выдаваемая яркость, что является несоблюдением стандартов и вообще может привести к нежелательным последствиям. Имеем:

$$U_a = U_b = U_c = \frac{U_{\text{фаз } 110 \text{ кВ}}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \text{ кВ}}{1.73} = 63.5 \text{ кВ.}$$

Таким образом, мы имеем основные параметры системы за исключением емкостей. В статье [5] предлагается рассчитывать емкости между антенной и фазами по формуле:

$$C = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{D}{R}\right)},$$

где C – емкость между проводниками (фазой и антенной), радиусом R на расстоянии D друг от друга при длине антенны L .

Такой подход, однако, не является точным и результативным, так как: конструктивно может быть выгодно сделать радиус антенны отличным от радиуса фазного провода; не учитывается емкость, наведенная между антенной и землей, которая имеет серьезное влияние на объем отбираемой мощности ВЛ; длина антенны может быть много меньше длины провода, что тоже повлияет на результат. Для более точного анализа в следующих главах для расчета выше указанных емкостей мы воспользуемся специализированной программой.

Собрав необходимые данные и схемы воедино, ознакомившись с руководством [10], была построена модель, представленная ниже.

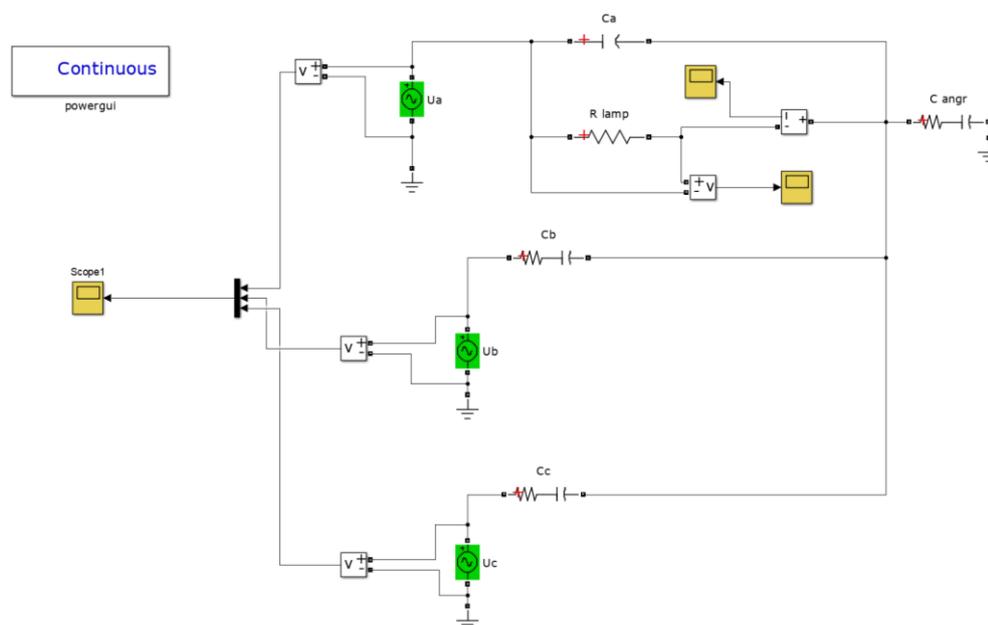


Рис. 3.1.3. Модель системы проводов ВЛ и лампы в среде MATLAB Simulink (Желтые элементы - осциллографы для снятия токов и напряжений)

Проведем расчет для данных из статьи [5] (типовая опора 330 кВ):

$C_a = 111.8$ пФ – емкость между фазой А и антенной лампы, $C_b = 65.2$ пФ – емкость между антенной и фазой В, $C_c = 58.6$ пФ – емкость между антенной и фазой С. Емкость антенны на землю $C_{аз}$ не учитывалась, однако, в дальнейшем, мы будем ее учитывать.

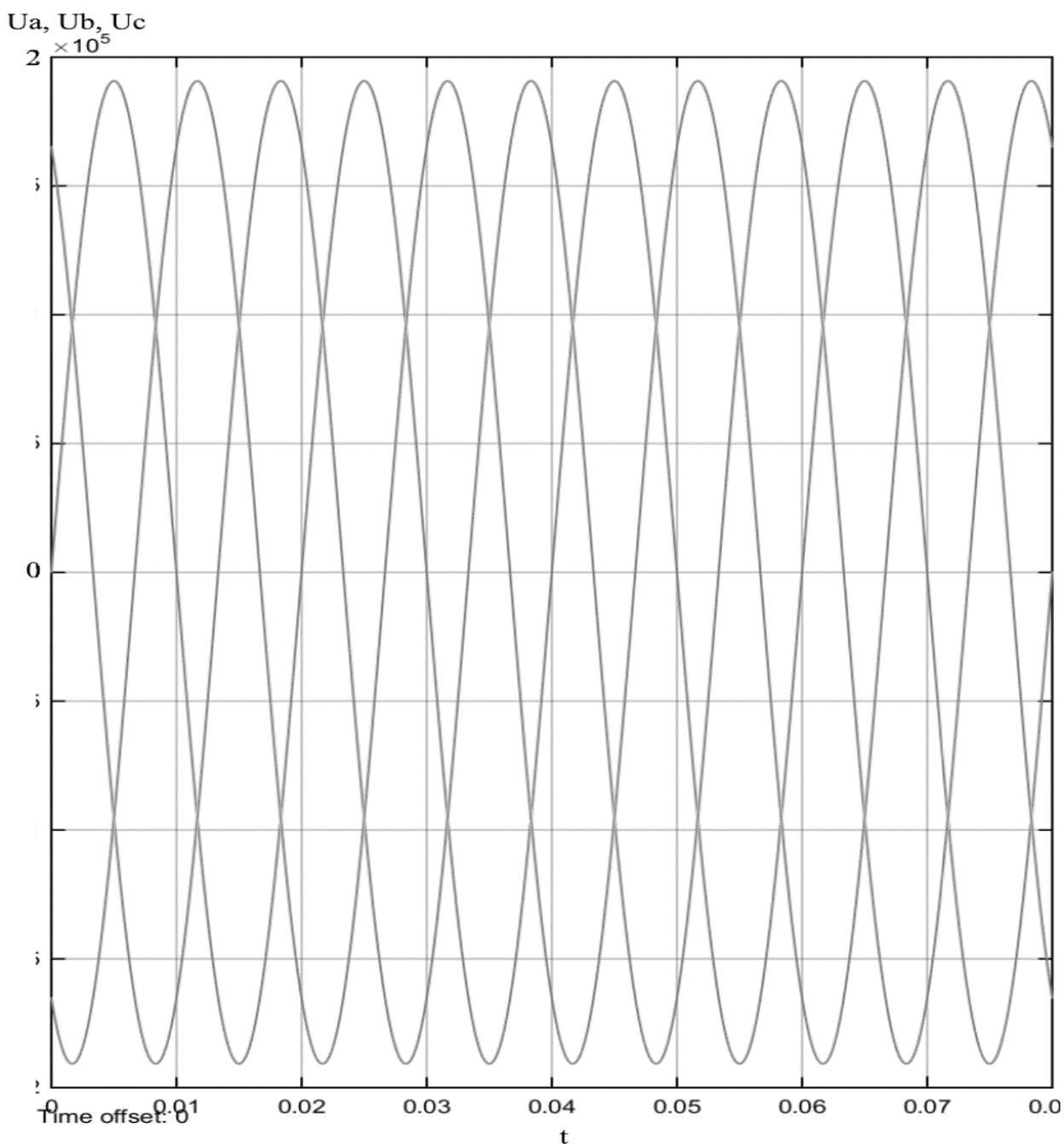


Рис. 3.4. Осциллограмма фазных напряжений ($U_{\text{фаз } 330 \text{ кВ}} = 190 \text{ кВ}$)

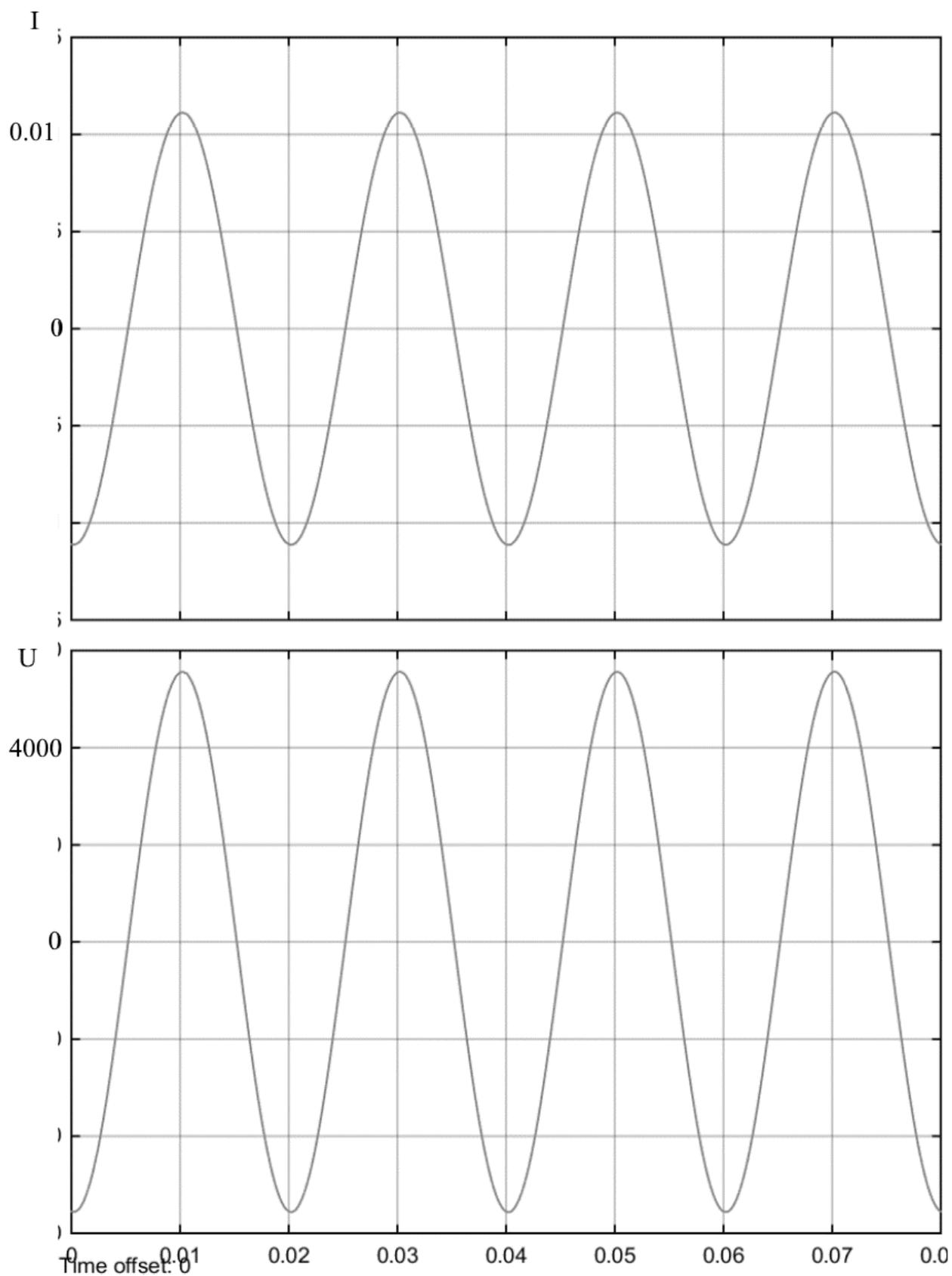


Рис. 3.5 Ток и напряжение на лампе ($I_{max}=11.1$ мА $U_{max}=5.5$ кВ).

3.2. Влияние емкостей на ток через лампу.

Емкости, образующиеся между элементами в системе, имеют непосредственное влияние на объем мощности, отбираемой для питания лампы. При расположении антенны с лампой на фазе А, так же как в нашей модели, и при начальных данных: $C_a = 78.9$ пФ – емкость между фазой А и антенной лампы, $C_b = 58$ пФ – емкость между антенной и фазой В, $C_c = 57.7$ пФ – емкость между антенной и фазой С, $C_{аз} = 56.5$ пФ, класс напряжения – 110 кВ, $U_{\text{фаз } 110 \text{ кВ}} = 63.5$ кВ.

Для начала рассмотрим влияние учета емкости антенна-земля на результат моделирования. Будем приводить только значение тока, так как напряжение в данной модели пропорционально току и находится путем умножения значения тока на величину активного сопротивления лампы. Без учета емкости антенны на землю получаем ток, равный 3.47 мА. Тот же ток при учете емкости антенны на землю становится уже равным 4.59 мА.

При увеличении емкости между антенной и фазой А максимальный ток незначительно снижается.

При увеличении емкостей между антенной и фазами В и С происходит значительный рост величины тока – до трети от первоначального значения. Таким образом, получим ток более 30 мА, что на самом деле нам и не требуется.

3.3. Определение параметров системы, влияющих на емкости и ток

Основной параметр ЛЭП, влияющий на величину тока – является ее класс напряжения. Сохранив параметры модели, но увеличив величину выдаваемого генераторами напряжения мы в пределе в два раза увеличиваем максимум тока, что обусловлено большим накопленным зарядом в системе емкостей.

Влиять на междуфазные емкости можно посредством выбора фазного провода, на котором будет закреплена антенна и лампа. Этим мы будем менять

расстояния между фазными проводами и, соответственно, величину отбираемой мощности.

Емкость между антенной и землей можно изменить, меняя высоту подвеса антенны, выбора нужного расположения на одном из фазных проводов, если они имеют разные высоты подвеса.

Также стоит обратить внимание на то, что величина отбираемой мощности зависит от соотношения между емкостью антенны на землю и всеми остальными емкостями - C_a , C_b и C_c . Если увеличить величину подвеса антенны, то мы увеличим емкость между ней и землей, однако при этом снизятся емкости между антенной и фазными проводами. В общем случае, можно сказать, что данный баланс не вызовет изменений, однако расчеты показывают увеличение тока через лампу, а наблюдения – увеличение яркости свечения лампы.

Таким образом, для возможности оформить правдивые и точные выводы касательно влияния параметров системы проводов и антенны, необходимо провести расчеты всех емкостей, представленных в системе.

ГЛАВА 4 – ДИЗАЙНЫ АНТЕНН И ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ ИМИ ПАРАМЕТРЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ. УЧЕТ РЕАЛЬНОЙ ВАХ. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Для увеличения предела отбираемой мощности (прежде всего увеличения тока через лампу) можно попробовать использовать отличные от прямых формы антенн. Это позволит оптимизировать конструкцию, уменьшить некоторые геометрические параметры. Правда, это увеличит затраты на материалы и усложнит обеспечение требований [11]. Перейдем к решению выше указанных проблем.

4.1. Дизайны антенн и обеспечиваемые ими параметры

Моделирование и получение различных емкостей мы будем проводить в специализированной недавно разработанной программе CAPCOM, которая осуществляет расчеты с использованием вычислительных моделей другой программы COMSOL Multiphysics. Метод расчета, используемый в программе, именуется методом площадок. В общем случае мы применяем расчеты для проводов линии электропередач и емкости между цилиндром (проводом) и землей из учебника [12]. Однако, программа CAPCOM использует метод площадок, описанный в [13], который заключается в непосредственном вычислении при помощи разбиения проводников на множество площадок и дальнейшем подсчете емкости.

Стоит отметить, что метод площадок обладает более высокой точностью вычислений при более сложных вычислениях, нежели метод описанный в учебнике ТОЭ [12].

Для начала мы определим начальные условия для расчета. $U_{\text{ном}} = 110$ кВ; опора – ПСБ-110-1, фазы ВЛ состоят из провода АС-240/32. Геометрические параметры опор и изоляторов найдем в справочнике [14]. Радиус провода – 10,8 мм; фазные провода подвешены на гирляндах из 15 изоляторов типа ПС70-Д. Строительная высота одного изолятора 0,127 м. Длина гирлянды 1,905 м.

Высота провеса нижних проводов – 9.33 м, верхнего 12.33 м. Ниже на рисунке представлен эскиз опоры.

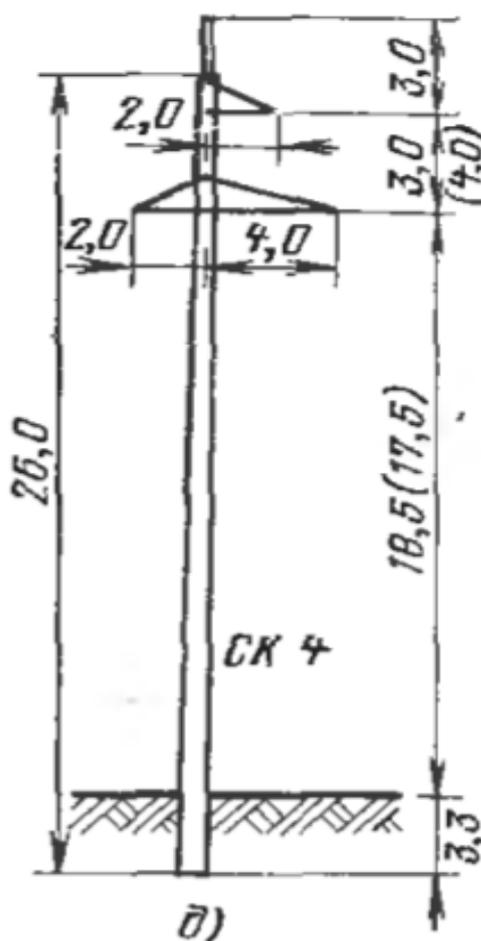


Рис. 4.1.1. Эскиз опоры ПСБ-110-1

Само собой, стоит начать с привычных для нашего времени прямых антенн. Построение системы проводников проводится для каждой пары проводников (антенна – фаза А, антенна – земля и так далее) путем задания их направляющих (объемных координат в декартовой системе X-Y-Z).

Сначала мы задаем радиусы сечения фазы и антенны в 1, затем в окне 2, в таблицу, в нашем случае относящуюся к антенне, вписываем координаты, задающие кривую, принимаем изменения в 4. То же самое проводится и с окном 3. Если мы рассчитываем емкость между антенной и землей, то в окне 5 задается нужная нам система, где нужны координаты лишь антенны. Затем мы последовательно прожимаем 6, 7 и 8 и в 9 получаем результат для емкости

между фазным проводом и антенной или для емкости между антенной и землей. В окне 10 представлена система заданных проводников. Такие действия проводятся между антенной и всеми остальными элементами емкостной системы.

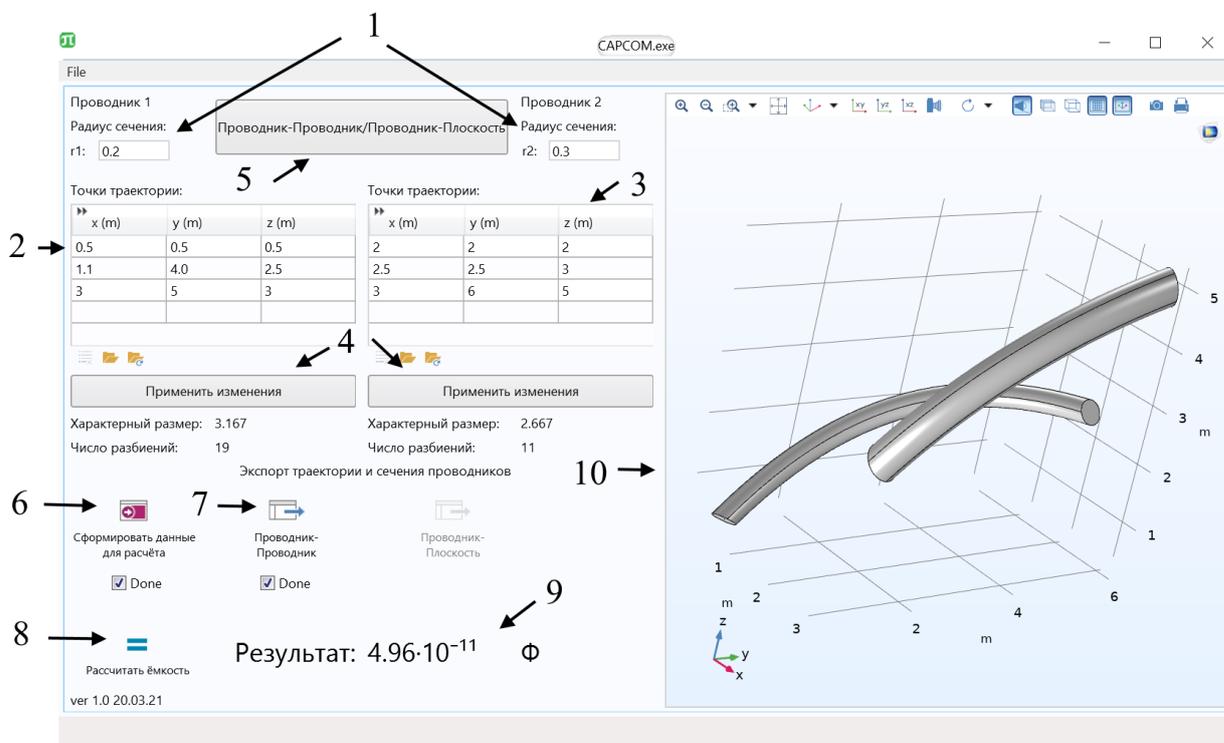


Рис. 4.1.2. Рабочее пространство программы

Ниже на рисунках представлены результаты задания координат для получения антенн различной формы длиной в 6 м. Для исследования были взяты такие формы как: прямая, прямоугольная с округлыми краями, прямоугольная с дополнительной осевой линией.

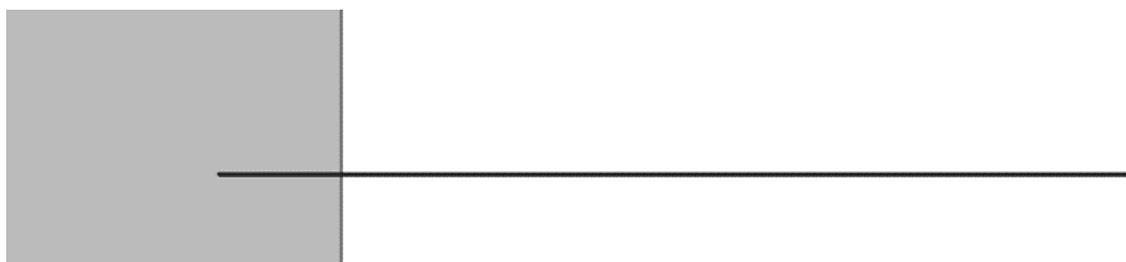


Рис. 4.1.3. Классическая прямая антенна

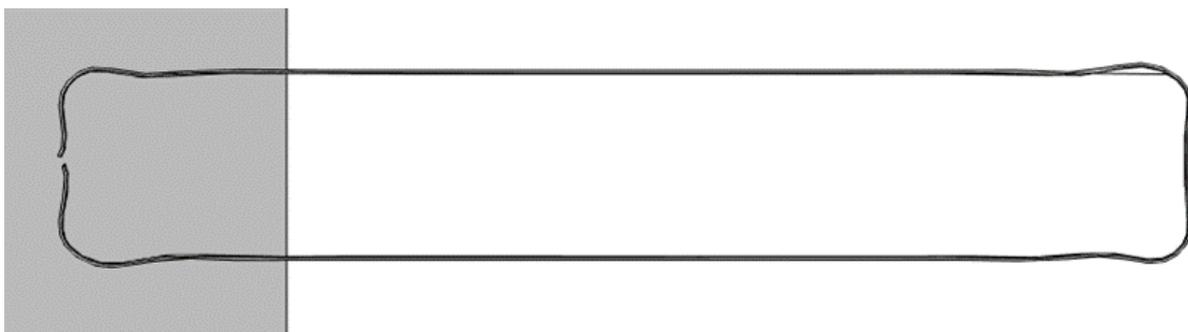


Рис. 4.1.4. Прямоугольная с округлыми краями

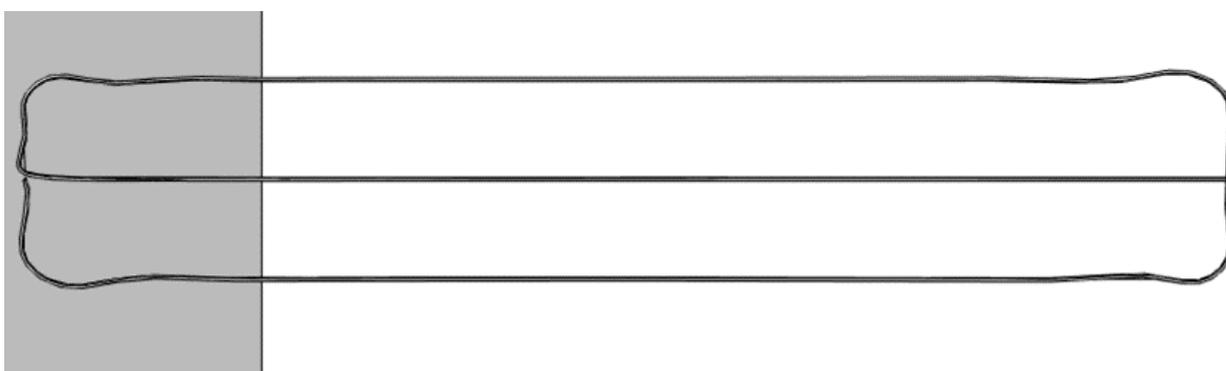
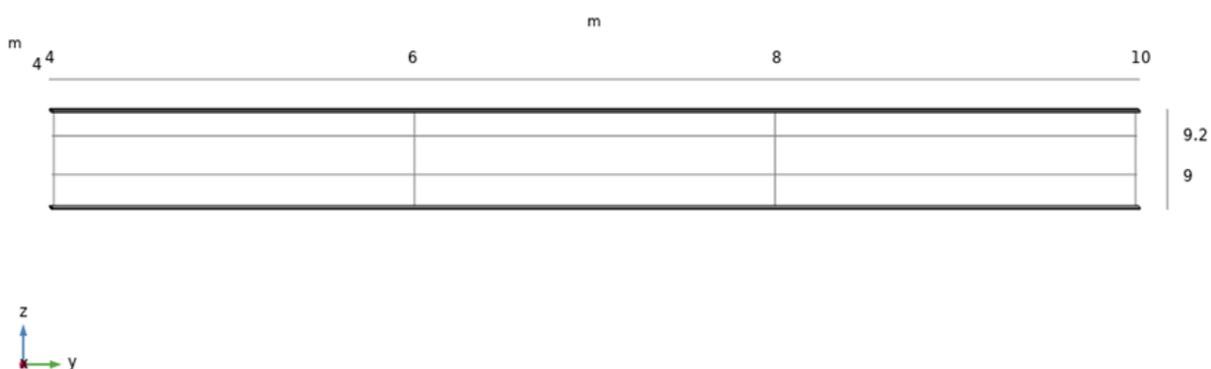


Рис. 4.1.5. Прямоугольная с округлыми краями и дополнительной осевой линией

Эти изображения относятся к системе антенна-плоскость, объемность показана на изображениях ниже.

Рис. 4.1.6. Прямая антенна и фазный провод в осях $x-y$

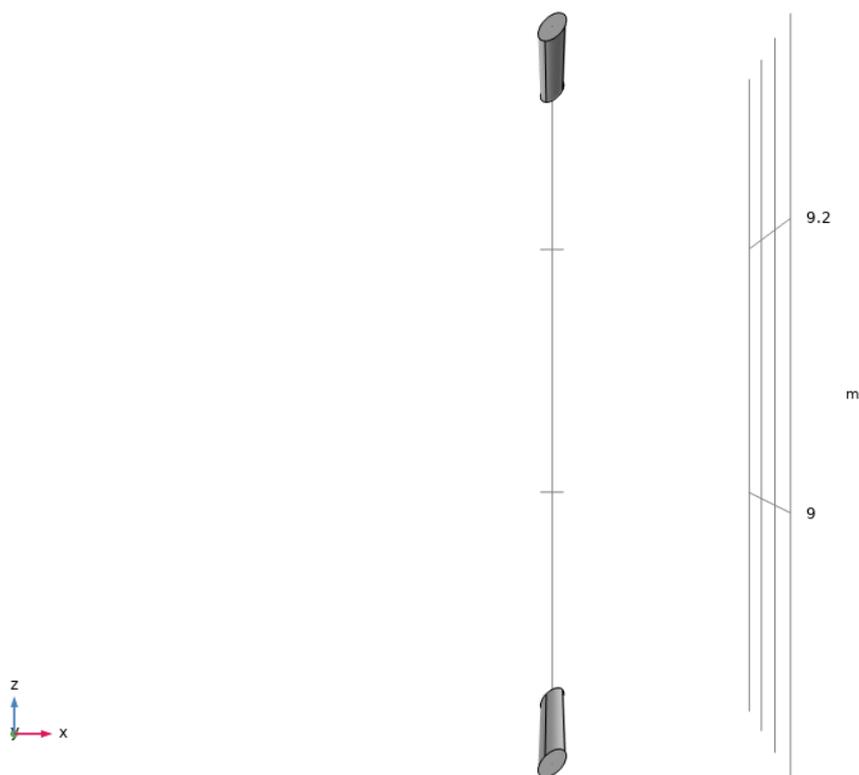


Рис. 4.1.7. Прямая антенна и фазный провод в осях z-x

При построении нельзя допускать пересечения кривой самой себя, поэтому замыкания контура нет, однако, на точность результата это не влияет.

Плоскость каждой из антенн была параллельна земле. Также была добавлена перпендикулярная земле прямоугольная с округлыми краями и дополнительной осевой линией и прямая антенна длиной в 10 м, которыми на данный момент снабжаются газоразрядные лампы, размещаемые на ВЛ 110 кВ.

Для каждой из антенн был проведен расчет четырех параметров: C_a , C_b , C_c и $C_{аз}$. Ширина прямоугольных антенн – 1 м, длина в таблице, радиус – стандартный, 12 мм. Результаты представлены в таблице ниже.

Таблица 4.1.1.

Рассчитанные емкости (Ф)

Антенна	Ca	Cb	Cc	Cgrnd
1. Прямая (6м)	3.94E-11	2.81E-11	2.78E-11	2.65E-11
2. Прямая (10м)	6.65E-11	4.56E-11	4.51E-11	4.21E-11
3. Прямоугольник (6м)	7.33E-11	5.23E-11	5.18E-11	5.03E-11
4. Прямоугольник и прямая (6м)	8.73E-11	5.90E-11	5.84E-11	5.70E-11
5. Прямоугольник и прямая (перпенд.) (6м)	8.16E-11	5.96E-11	5.93E-11	5.80E-11

Таблицу выше для антенн 1-5 назовем основной, она относится к высоте подвеса антенны в 0.5 м и радиусу антенны в 10.8 мм. Рассчитаем так же емкости для некоторых антенн для высоты подвеса 0.25 м и для радиусов антенны меньшего диаметра, например 12 мм (24 мм ранее), для дальнейшего анализа результатов.

Таблица 4.1.2.

Емкости для высоты подвеса 0.25 м и различных радиусов антенны (Ф)

Антенна	Радиус антенны							
	6 мм				12 мм			
	Ca	Cb	Cc	Cgrnd	Ca	Cb	Cc	Cgrnd
2. (6 и 7)	7.23E-11	4.28 E-11	4.22 E-11	3.93 E-11	7.90 E-11	4.57 E-11	4.51 E-11	4.21 E-11
4. (8 и 9)	9.42 E-11	5.61 E-11	5.34 E-11	5.38 E-11	1.04E-10	6.01 E-11	5.93 E-11	5.78 E-11
5. (10 и 11)	8.53 E-11	5.59 E-11	5.54 E-11	5.39 E-11	9.35 E-11	5.98 E-11	5.93 E-11	5.80 E-11

Исходя из результата, учтем, что ток, в общем случае, пропорционален средней величине полученных емкостей ($C_{cp} = \frac{C_a + C_b + C_c + C_{grnd}}{4}$), в дальнейшем из сложных антенн будем рассматривать только прямоугольную с округлыми краями и дополнительной осевой линией в двух вариантах исполнения –

параллельно поверхности земли и перпендикулярно ей (антенны 4, 5, 8, 9, 10 и 11).

4.2. Электрический расчет

Вернемся к MATLAB Simulink. Полученные в пункте 4.1 емкости (для самого удачного варианта антенны) мы подставляем в построенную в главе 3 модель.

За номинал, то, с чем мы будем сравнивать полученные токи, возьмем наибольший ток, образованный при применении прямой антенны с длиной равной 10 м. Расчет в MATLAB дает такие результаты: для антенны длиной 10 м, высотой подвеса 0.25 м и радиусом 12 мм $I_{\text{ном}}=3.86$ мА при напряжении 1.93 кВ.

Ниже приведем расчеты токов для остальных антенн и сравним с номиналом, приведя отношение максимального тока к номинальному.

Таблица 4.2.1.

Сравнение результатов электрического расчета, проведенного в MATLAB Simulink

		6 m							
	Прямая, 10 м, рад – 12 мм, подвес – 0.5 м	0.25, 6, //	0.25, 6, .!.	0.25, 12, //	0.25, 12, .!.	0.5, 6, //	0.5, 6, .!.	0.5, 12, //	0.5, 12, .!.
U, В	1930	2180	2204	2364	2360	2204	2220	2364	2360
I, мА	3.86	4.36	4.4	4.73	4.72	4.41	4.44	4.73	4.72
$I/I_{\text{ном}}$	1	1.13	1.14	1.23	1.22	1.14	1.15	1.23	1.22

В заголовке: 1 цифра – высота подвеса антенны (м), 2 – радиус антенны (мм), 3 - // - подвес параллельно земле, .!. – подвес перпендикулярно земле.

Как видно из таблицы, каждый вариант исполнения сложной прямоугольной антенны, при своей длине, меньшей чем у прямой в 1.5 раза, выдает ток, на 13-23 % больше чем у той же прямой. Если увеличить длину

прямоугольной антенны до 10 м, то разница между токами составит уже порядка 80 % для обоих вариантов подвеса.

4.3. Учет реальной ВАХ

Для получения сведений о процессах, происходящих в газоразрядных и влияющих на электрические характеристики, обратимся к книге [15].

Специфика ВАХ заключается в том, что она должна обеспечить и показать самые главные зависимости в работе лампы. На осциллограмме тока и напряжения должны быть следующие участки: рост тока и напряжения, зажигание, падение напряжения, переход тока и напряжения через ноль, повторение. Приведем два изображения – из патента [4] и книги [15]:

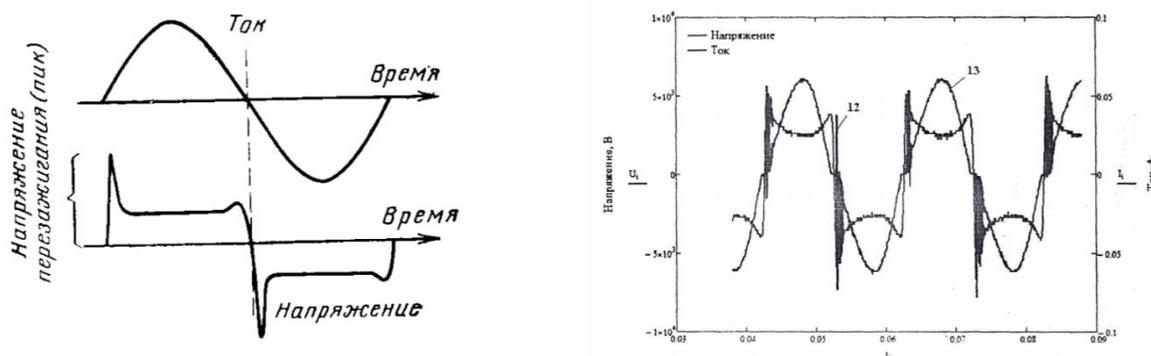


Рис. 4.3.1 Осциллограммы тока и напряжения (слева теоретическая, справа экспериментальная)

Ток близок к синусоидальному, в периоде при первом его прохождении через ноль напряжение зажигания должно быть выше.

Типичная и экспериментальная ВАХ для газоразрядной лампы представлена ниже. С помощью второй зависимости мы сможем учесть нелинейность сопротивления току лампы.

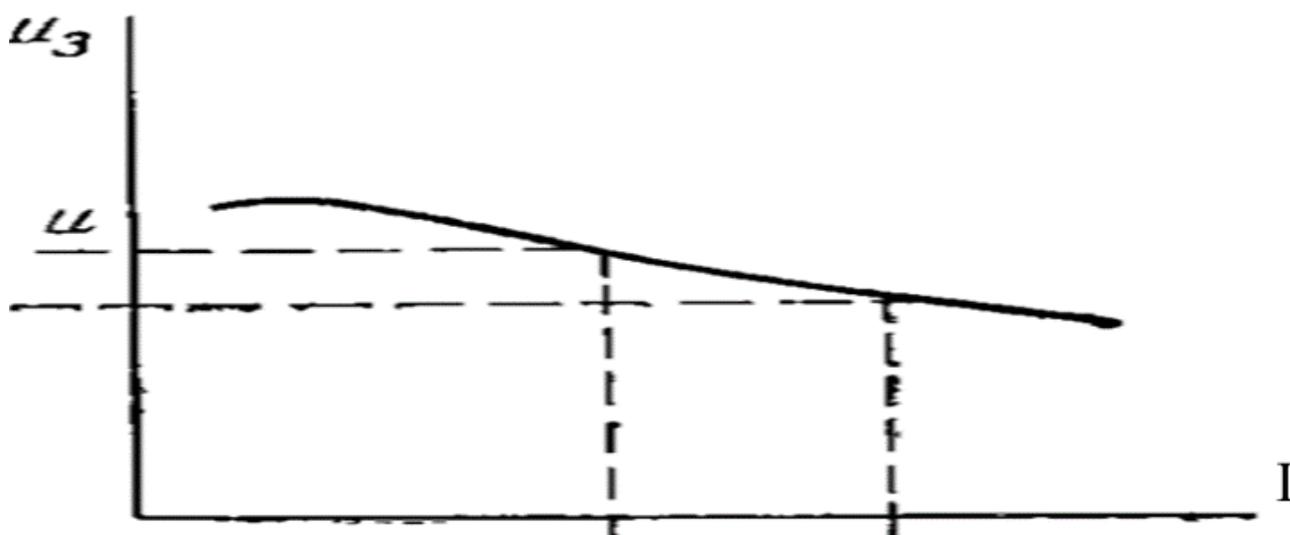


Рис. 4.3.2. ВАХ газоразрядной лампы.

Оценив кривую справа, можно построить зависимость напряжения от тока, используя встроенные циклы программы Simulink. Изменив схему из рис. 3.1.3., добавив в нее источник напряжения, управляемый током, и блок, преобразующий сигнал тока в напряжение. Текст программы можно найти в приложении 1. После этих изменений модель предстанет в новом виде:

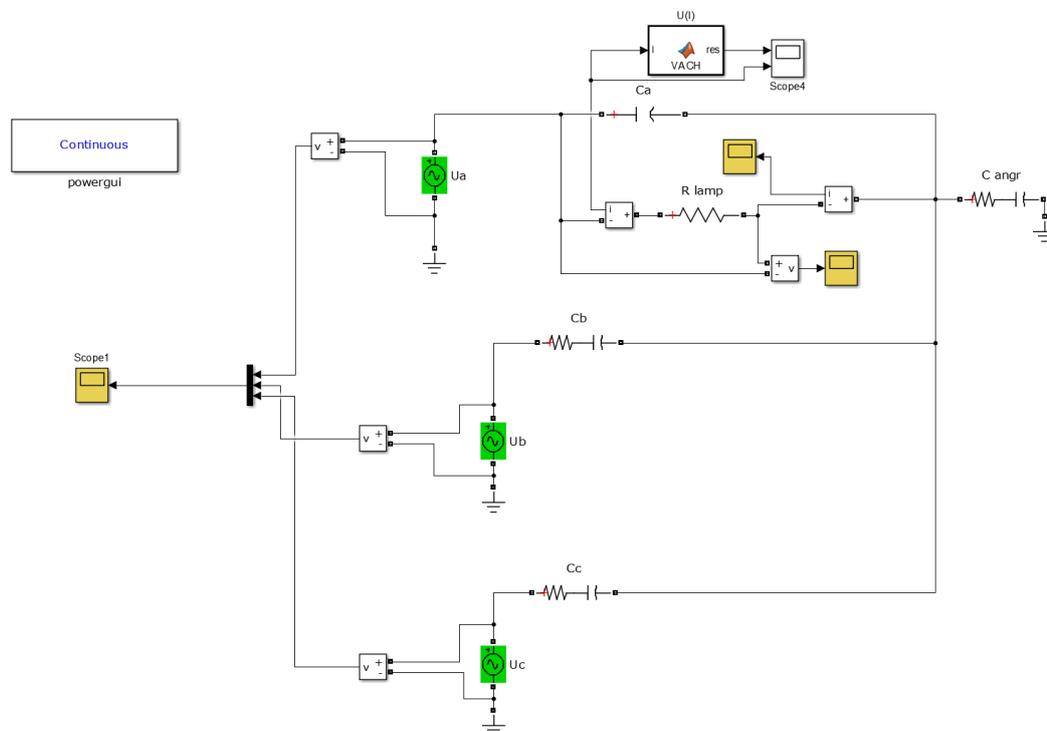


Рис. 4.3.3. Модель с учетом влияния ВАХ

Проведем расчет для сложной антенны с длиной 6 м. Возьмем прямоугольную с дополнительной осевой линией с радиусом 12 мм, подвешенную параллельно земле. Осциллограммы тока и напряжения представлены ниже на рисунке:

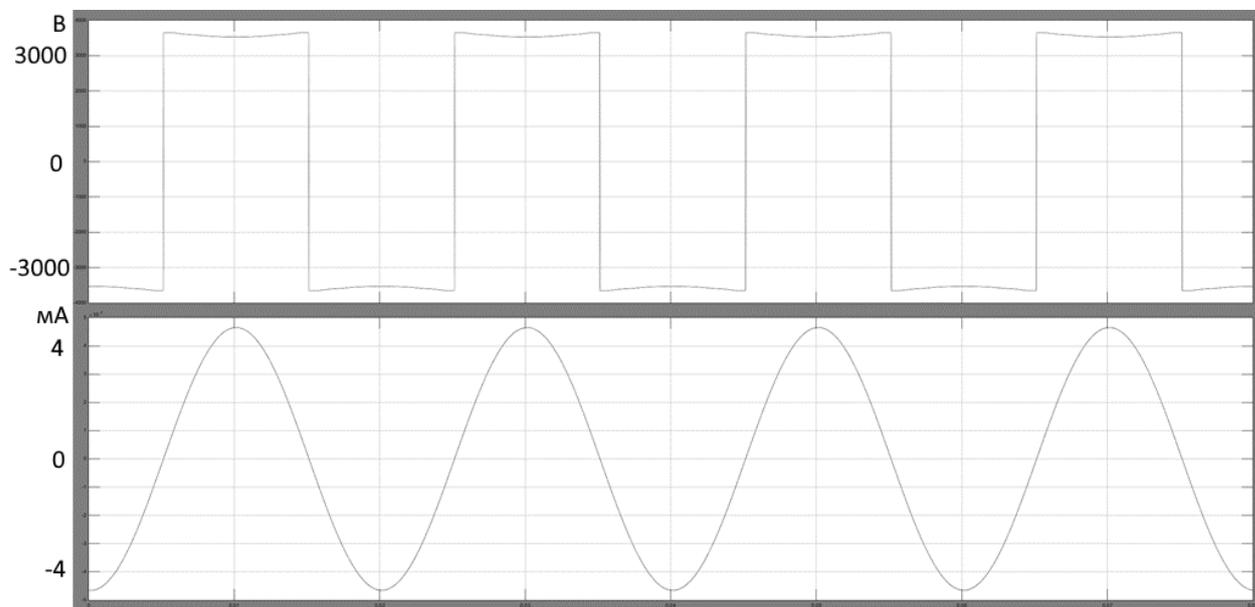


Рис. 4.3.4. Осциллограмма тока и напряжения ($U_{max} = 3.65$ кВ, $I_{max} = 4.65$ мА)

Осциллограмма далека от совершенства, однако она дает увидеть, что присутствует падение напряжения при росте тока на одном из участков, и то, что рост и падение напряжения нелинейны.

4.4. Аэродинамические характеристики

Аэродинамический расчет является важной частью данной работы, так как, во-первых, отклонение проводов под действием ветра вызывает дополнительные растяжения проводов ВЛ, что при сильных порывах ветра станет испытанием их на прочность, а во-вторых, отклонение может привести к опасному сближению проводящих частей ВЛ, что, с некоторой вероятностью, приведет к возникновению аварии.

Для расчета аэродинамических показателей понадобятся характеристики труб разного диаметра. Мы возьмем их для труб типовых размеров с интернет-ресурса [16]. Также мы возьмем для сравнения 2 металла – сталь и алюминий.

Таблица 4.4.1.

Масса металлических труб (кг)

Материал	Труба	Масса 1 м трубы
Сталь	24x2	1.084
	12x1	0.271
Алюминий	24x2	0.377
	12x1	0.094

Перед расчетом надо определить некоторые коэффициенты и исходные данные. Коэффициент сопротивления формы, определяющий величину сопротивления тела определенной формы потоку жидкости или воздушной массы, возьмем из статьи [17].

Type of body		Reference area S ($b = \text{length}$)	Reynolds number Re	Drag coefficient C_D
Square rod		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 2.00$
		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.50$
Semicircular shell		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.20$ $\leftarrow 2.30$
Semicircular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.15$ $\leftarrow 2.15$
Equilateral triangle cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.40$ $\leftarrow 2.10$
Flat plate		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.90$
T-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.80$ $\leftarrow 1.65$
I-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 2.05$
Hexagon		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.00$
		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 0.70$
Circular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 0.51$

Рис. 4.4.1. Коэффициенты сопротивления формы для некоторых поверхностей

Нас интересует коэффициент для прямого кругового цилиндра (Circular cylinder).

Будем исходить из самых тяжелых условий: скорость ветра – 20 м/с, гололед, повышенная плотность воздуха.

C – коэффициент, учитывающий гололед, k – коэффициент учитывающий расхождение потока после столкновения с одной частью антенны.

$$\text{Исходные данные: } \frac{v^2}{2} = 200 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}, \rho = 1.3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, C = 1.2, \sin^2 \alpha = 1, k = 0.9$$

Попробуем решить простую задачу на отклонение подвешенного тела под воздействием некоторой постоянной силы с применением некоторых идей из [11].

В общем случае формула для расчета отклонения выглядит так:

$$\text{tg}(\gamma) = \frac{F}{F_a + 0.5 \cdot F_{is}}$$

где F – сила воздействия на антенну, F_a – вес антенны, F_{is} – вес подвесных изоляторов. Рассчитаем массы антенн.

Таблица 4.4.2.

Массы антенн (кг)

г, мм	Материал	Прямая	Прямоугольник и прямая
12	Сталь	6.50	23.85
6		1.63	5.96
12	Алюминий	2.26	8.29
6		0.56	2.06

Далее рассчитываем силы тяжести, приняв $g=9.81$ Н/кг.

Масса 3 изоляторов ПС-70 равна 10.2 кг.

$$F = f'_a \cdot l_e,$$

где l_e – эквивалентная длина антенны (с учетом k), f'_a - сила на 1 м антенны. Коэффициент k приблизительно учитывает расхождение воздушной массы после столкновения с первым препятствием, используется только при параллельной сложной антенне, в остальных случаях эквивалентная расчетная длина останется неизменной, что увеличит расчетные отклонения.

Таблица 4.4.3.

Эквивалентные длины антенн

Параметр	Прямая	Прямоуг. и.прямая (паралл.)	Прямоуг. и.прямая (перпенд.)
Длина, м	6	22	22
k	1	k^2	1
l_e , м	6	17.8	22

f'_a найдем по следующей формуле:

$$f'_a = \frac{C \cdot \rho \cdot v^2 \cdot D}{2},$$

где D – диаметр антенны. Получаем:

Таблица 4.4.4.

Силовое давление ветра на антенны (Н)

Радиус	Материал	Прямая	Прямоуг. и.прямая (паралл.)	Прямоуг. и.прямая (перпенд.)
12 мм	Сталь, алюминий	22.91	68.05	84.01
6 мм		11.46	34.03	42.00

Далее решение сводится к отысканию тангенса отклонения с помощью двух воздействующих на конструкцию сил – выводящей из равновесия силы ветрового давления из таб. 4.4.4. и силы тяжести, складываемой из силы тяжести изоляторов, предназначенных для подвеса, и силы тяжести самой антенны. Угол найдем через тангенс (отношение силового давления к весу конструкции).

Таблица 4.4.5.

Тангенсы отклонений

Радиус	Материал	Прямая	Прямоуг. и.прямая (паралл.)	Прямоуг. и.прямая (перпенд.)
12 мм	Сталь	0.20	0.18	0.20
6 мм		0.17	0.24	0.26
12 мм	Алюминий	0.32	0.39	0.44
6 мм		0.21	0.36	0.41

Взяв арктангенсы, получим:

Таблица 4.4.6.

Углы максимального отклонения (градус)

Радиус	Материал	Прямая	Прямоуг. и.прямая (паралл.)	Прямоуг. и.прямая (перпенд.)
12 мм	Сталь	11.38	10.19	11.40
6 мм		9.84	13.24	14.79
12 мм	Алюминий	17.61	21.23	23.56
6 мм		11.66	19.97	22.18

Расчет выше был проведен для скорости ветра, в большей части РФ приравниваемой к ураганной.

Максимальное отклонение будет у сложных антенн, ввиду их больших габаритов. Если брать среднюю скорость ветра по ЛО, равную 5 м/с, то получим следующие результаты:

Таблица 4.4.7.

Углы максимального отклонения при НУ (градус)

Радиус	Материал	Прямая	Прямоуг. и.прямая (паралл.)	Прямоуг. и.прямая (перпенд.)
12 мм	Сталь	0.72	0.64	0.72
6 мм		0.62	0.84	0.95
12 мм	Алюминий	1.14	1.39	1.56
6 мм		0.74	1.30	1.46

Таким образом, для оптимального решения необходимы дополнительные расчеты, которые покажут нужные результаты для масс антенны (увеличивающей нагрузку на фазы ВЛ и в то же время снижающей колебания и отклонения конструкции).

Также стоит отметить, что при расчете были допущены некоторые допущения: фазный провод принят за статичный недвижимый объект; для сложной антенны – не учтено движение элементов относительно друг друга, то есть она остается либо параллельной, либо перпендикулярно земле все время, для решения мы представляем ее как точку с концентрацией массы, к которой приложена сила; не рассматривалось продольное влияние ветровых потоков; эквивалентная длина, а соответственно и масса, рассчитаны с помощью приближительного коэффициента.

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАСЧЕТОВ

В предыдущих главах был рассмотрен электрический и аэродинамический расчет. Если материал антенны, как проводника, никак не влияет на результат отбора мощности и влияет на аэродинамические показатели, то остается только рассмотреть влияние материалов на итоговую стоимость.

Для решения задачи по оценке стоимости было решено обратиться к торговой интернет-площадке по продаже строительных материалов [18]. Минус подобного действия заключается в том, что рассмотренные цены будут розничными. Тем не менее, приведем стоимости алюминиевых и стальных труб конфигурации 24x2 и 12x1.

Таблица 5.1.

Стоимости алюминиевых и стальных труб нужного сечения (руб/кг)

Материал	Труба	Стоимость
Сталь нержавеющая	24x2	176
	12x1	156
Алюминий	24x2	600
	12x1	568

Обратившись к таб. 4.4.2. и заменив прямую антенну длиной в 6 м на антенну длиной в 10 м (умножив массу на $\frac{10}{6} = \frac{5}{3}$) найдем стоимости каждой антенны. Мы производим замену для того, чтобы сравнить мощностные показатели предлагаемых прямых антенн и оценить вклад стоимости материалов в получаемый ток и аэродинамические характеристики.

Таблица 5.2.

Стоимости антенн (тыс. руб.)

г, мм	Материал	Прямая (10 м)	Прямоугольник и прямая (6 м)
12	Сталь нержавеющая	1,9	4.2
6		0.4	0.9
12	Алюминий	2.3	5.0
6		0.5	1.1

Из таблицы видно, что стоимость сложной антенны примерно в 2 раза больше, нежели у прямой. Однако, они выдают токи на 20% большие токов прямых антенн. При проектировании обширных энергосистем, прилегающих к аэродромным территориям, это может стать серьезной проблемой, вызвав дополнительные оценочные расчеты.

Оценим показатель устойчивости антенны (из результатов аэродинамического расчета представленных в таб. 4.4.6.) на стоимость. Устойчивостью назовем запас угла отклонения (из 90° вычтем угол отклонения). Этот параметр косвенно включает в себя и массу устройства. Из сложных антенн выберем параллельную, прямую возьмем с длиной 10 м, так же умножив ее угловые показатели на коэффициент.

Таблица 5.3.

Устойчивость на стоимость (градус на тыс. руб.)

г, мм	Материал	Прямая (10 м)	Прямоугольник и прямая (6 м)
12	Сталь нержавеющая	37.4	19.0
6		184.0	85.3
12	Алюминий	26.4	13.8
6		141.1	63.7

Введенный коэффициент максимален для прямых антенн, превосходя коэффициент для сложной антенны примерно в 2 раза. При меньшей стоимости они демонстрируют большую устойчивость, отклоняясь на меньшие углы.

Таким образом, анализируя полученные в этой главе данные, можно сделать вывод, что сложные антенны являются более предпочтительными в плане отбора мощности. Однако, их повышенная стоимость, более сильная, из-за из габаритов, подверженность ветровым нагрузкам делают однозначный вывод затруднительным. Ситуация усложняется, если мы рассматриваем большие энергетические системы с протяженностью в десятки и сотни километров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С ходом времени, авиация рабочего и личного пользования получает все большее распространение. Неосмотрительность, неподготовленность экипажа летательного средства может привести к аварии, в частности к столкновению с ЛЭП, что в свою очередь приводит к травмированию, гибели экипажа, повреждению объектов инфраструктуры, аварийным отключениям потребителей от сети. Именно поэтому необходимо повсеместно вводить системы световой маркировки проводов ЛЭП.

Для этих целей используются специальные газоразрядные лампы, работающие под высоким напряжением. Инновации позволяют использовать новые материалы и технологии, что уменьшает размеры, рабочий ток и напряжение, повышают надежность и световую отдачу, экономность.

Отечественная научная и инженерная работа позволила получить выгодный во многих отношениях образец газоразрядной лампы, обладающий множеством преимуществ перед аналогами.

Новый образец, однако, при опытной эксплуатации не достигал в некоторых случаях эксплуатации на линиях класса 110 кВ своих оптимальных свойств, связанных с яркостью свечения, необходимой для заметности. Рассмотренные и рассчитанные способы электростатического отбора мощности с использованием новой формы емкостных антенн сложной формы позволяют повысить объем отбираемого с проводов ВЛ тока, что должно привести к достижению оптимальных, заданных стандартами параметров свечения.

Усложнение конструкции ведет и к усложнению расчетов, увеличению числа факторов, учитываемых при вычислениях.

В целом цель работы достигнута: смоделирована новая форма антенны, проведен электрический и приближительный аэродинамический расчет. По предварительными результатам ток через лампу, при использовании новой

сложной антенны, вырастет на 20% при меньшей длине и станет больше на 80% при длине прямой антенны для лампы на линии класса 110 кВ. Однако, стоит отметить, что множество факторов не было учтено. Этими факторами являются: не учтен провис проводов ВЛ, из-за которого должна повышаться емкость между антенной и проводом, к которому она прикреплена; не учтена вся длина фазных проводов, получаемая средняя емкость, а соответственно и ток, должны быть больше; реальная вольт-амперная характеристика учтена лишь поверхностно, в будущем стоит рассмотреть ее более детально; в аэродинамическом расчете необходимо провести полное 3D моделирование воздействия воздушных масс на конструкцию антенны, при этом включить в модель и сам фазный провод; необходимо рассчитать параметр, отвечающий за допустимость использования антенн при больших, чем рассмотренные, скоростях ветра. Каждое из этих допущений необходимо пересмотреть при дальнейшей работе.

Таким образом, при выполнении работы была достигнута ее основная цель, показан ход ее достижения, а также построен план для исправления в перспективе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Информация о случаях столкновения воздушных судов с проводами линий электропередачи. Федеральное агентство воздушного транспорта. М., 2013.
- [2] Руководство по проектированию аэродромов. Часть 4. Глава 14. Визуальные средства. ИКАО. Издание четвертое – 2004.
- [3] Маркеры воздушных линий электропередач. СТО 34.01-2.2-016-2016 ПАО РОССЕТИ 02.11.2016.
- [4] Патент № 2720886 С1 Российская Федерация, МПК F21S 8/06. Система светового ограждения высоковольтных линий электропередачи : № 2019143041 : заявл. 15.10.2019 : опубл. 13.05.2020 / Г. Н. Федоренко.
- [5] Первая Российская система постоянной световой маркировки проводов линий электропередач высокого напряжения / И. О. Иванов, А. Е. Монастырский, А. С. Резник [и др.] // Материаловедение. Энергетика. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 20-30. – DOI 10.18721/JEST.26202.
- [6] Анализ систем МКО / Л. Д. Ложкин, А. А. Кузьменко // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 2. – С. 85.
- [7] ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кв и выше, 01.01.1999
- [8] Патент № 2640825 С1 Российская Федерация, МПК А01М 29/00. Автономное устройство для отпугивания птиц : № 2017109428 : заявл. 21.03.2017 : опубл. 12.01.2018 / А. Б. Моисеенко, А. Н. Шульгин.
- [9] Интернет ресурс: obsta.com, 11.05.2021, URL: <https://obsta.com/en>

[10] Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Саратов: Профобразование, 2017. – 288 с. – ISBN 9785448800856.

[11] Правила устройства электроустановок. Главы 1.1, 1.2, 1.7,1.9, 2.4, 2.5, 4.1, 4.2, 6.1-6.6, 7.1, 7.2, 7.5, 7.6, 7.10. – Москва : ЭНАС, 2013. – 552 с. – ISBN 9785424800313.

[12] Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. — 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. — СПб.: Питер, 2003. — 377 с.

[13] Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. — Санкт-Петербург: Энергоиздат,1981. -288 с.

[14] Справочник по электрическим установкам высокого напряжения. 3-е изд., перераб. и доп. / Баумштейн И.А., Бажанов С.А.—М.: Энергоатомиздат, 1989. —768 с.

[15] Газоразрядные лампы / Уэймаус Д. — Пер. с англ. под ред. Г. Н. Рохлина и М. И. Фугенфирова. М., "Энергия", 1977. —344 с.

[16] Интернет ресурс: Калькулятор Металла, 27.05.2021, URL: <https://metal-calculator.ru>

[17] Aziz, Elsayed & Esche, Sven & Chassapis, C.. (2008). Online Wind Tunnel Laboratory. 10.18260/1-2--3402.

[18] Интернет ресурс: tiu.ru, 27.05.2021, URL: <https://spb.tiu.ru>

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕКСТ ПРОГРАММНОГО БЛОКА ДЛЯ УЧЕТА ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЛАМПЫ

```

Editor - Block: lampa/U()
U()
1 function res=VACH(I)
2     U0=3.65e3;      I0=1e-3;
3     U1=3.61e3;      I1=2e-3;
4     U2=3.59e3;      I2=3e-3;
5     U3=3.55e3;      I3=4e-3;
6     U4=3.525e3;     I4=5e-3;
7     U5=3.5e3;       I5=6e-3;
8     Uk=3.49e3;      Ik=7e-3;
9
10
11     arg=sign(I);
12     i=abs(I);
13
14     if i<I0
15         U=U0;
16     elseif i>=I0 & i<I1
17         U=U0-(U0-U1)/(I1-I0)*(i-I0);
18     elseif i>=I1 & i<I2
19         U=U1-(U1-U2)/(I2-I1)*(i-I1);
20     elseif i>=I2 & i<I3
21         U=U2-(U2-U3)/(I3-I2)*(i-I2);
22     elseif i>=I3 & i<I4
23         U=U3-(U3-U4)/(I4-I3)*(i-I3);
24     elseif i>=I4 & i<I5
25         U=U4-(U4-U5)/(I5-I4)*(i-I4);
26     elseif i>=I5 & i<Ik
27         U=U5-(U5-Uk)/(Ik-I5)*(i-I5);
28     else
29         U=Uk;
30     end
31
32     res=U*arg;
33

```