

К ВОПРОСУ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВЕТООГРАЖДЕНИЯ ПРОВОДОВ И ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АВТОРЫ:

Д.Е. Титов,
Сколковский
институт науки
и технологий

С.С. Дементьев,
Волгоградский
государственный
технический
университет

К.В. Волхов,
Сколковский
институт науки
и технологий

А.В. Овчинников,
АО «Екатеринбург-
ская электро-
сетевая компания»

В статье приведены методики и результаты расчета основных параметров устройств питания огней светограждения, устанавливаемых на вершине опоры ВЛ и под потенциалом провода. Проведено технико-экономическое сравнение технических решений электропитания светограждения проводов и опор. Публикация выполнена в рамках НИОКР по заказу АО «ЕЭСК».

Ключевые слова: безопасность авиасообщений; светоограждение ЛЭП; емкостной отбор мощности; изоляция ВЛ; автономный источник питания; индуктивный отбор мощности.



ЛЭП со светограждением

АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Светооградительные огни применяются для повышения безопасности авиасообщений и устанавливаются в соответствии с требованиями [1–4] на опоре (заградительные огни для опор, ЗОМ) и на потенциале провода (заградительные огни для проводов, ЗОП) воздушной линии (ВЛ) электропередачи. ПАО «Россети» имеет собственный стандарт организации [5], дополняющий и уточняющий требования приведенных выше документов. В частности, светоограждение опор ВЛ следует организовывать по отдельным ВЛ (КЛ) 0,4–10 кВ, но при значительном удалении питающих подстанций допускается применение автономных систем питания светоограждения опор ВЛ на основе солнечных модулей и аккумуляторных батарей, помимо этого, п. 5.16 [5] допускает применение систем питания светоограждения на основе емкостного отбора мощности от фазного провода или от разземленного грозозащитного троса при условии защиты оборудования от грозových перенапряжений.

Питание ЗОМ от двух взаиморезервируемых источников является капиталоемкой задачей и фактически редко выполняется. Получили распространение автономные светооградительные огни с собственными электрохимическими источниками энергии, такие как огни производства АО «НИИПП» (Томск), которые требуют смены батареи раз в 8–12 месяцев, а также проведения периодического осмотра ВЛ для актуализации информации о работоспособности огней. Эти ограничения повышают затраты на эксплуатацию светооградительных огней и снижают надежность их работы.

Работы, направленные на снижение операционных затрат на эксплуата-

цию систем световой маркировки опор, увеличение продолжительности межремонтных промежутков с одновременным увеличением надежности работы, повышение безопасности полетов вблизи ВЛ, являются актуальными.

В настоящей статье приведены результаты технико-экономического сравнения нескольких подходов для организации питания ЗОП и ЗОМ. Расчет приведен для опор № 23–39 типа П110–6 ВЛ 110 кВ Нижнеисетская — Авиатор АО «ЕЭСК», расположенных на территории полос воздушных подходов к аэродрому Кольцово. В настоящее время на 17 опорах используются светосигнальные устройства с полупроводниковым источником света — ЗОП-5¹ для светового ограждения, смонтированные согласно проекту [6]. Существующая система светоограждения представлена на рис. 1. В фонарях установлены светодиодные лампы типа ЛПРК-03. Потребляемая мощность системы светоограждения 2,08 Вт. Блок питания системы батарейный, в котором используются четыре батареи «Лиман 2,6–4» ± 5,2 В.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВАРИАНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПИТАНИЯ ЗОМ И ЗОП

А. ЕМКОСТНОЙ ОТБОР МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ АНТЕННЫ

Суть емкостного отбора мощности заключается в том, что в электрическом поле проводов ВЛ параллельно им помещается изолированный от опоры провод (антенна), на котором наводится напряжение. Напряжение с помощью трансформатора понижается до напряжения нагрузки. Для обеспечения наибольшей величины отбираемой мощности цепь трансформатора и нагрузки работает в режиме, близком к резонансу тока.

Следует отметить, что коллективом советских ученых, а именно В.Д. Юренковым, Д.Н. Булашевичем, Г.Н. Баскаковым и др. в 1940–1950-е гг. была предложена исчерпывающая методика для определения потенциала и емкости антенны, выбора трансформатора и расчета токораспределения в схеме емкостного отбора мощности. Подобный способ электроснабжения — антенный отбор мощности от 200 до 500 Вт — предполагалось использовать для питания мелких потребителей, расположенных вблизи трассы высоковольтной линии, причем в качестве антенны мог выступать грозозащитный трос [7].

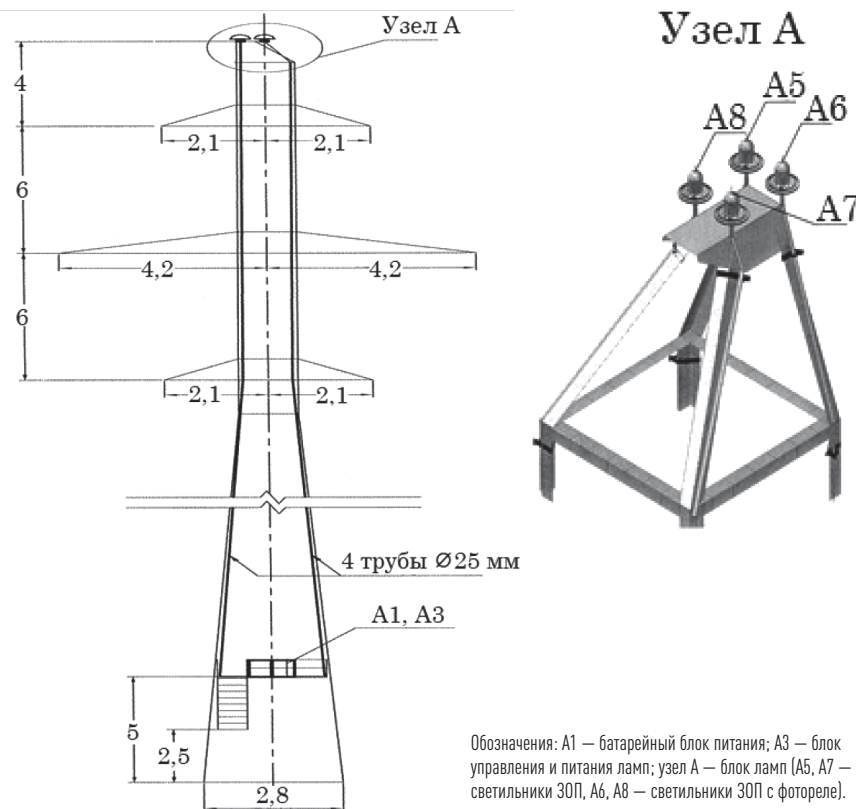
Из анализа уравнений, приведенных в статье В.Д. Юренкова «Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи» [7], следует, что методика расчета установки антенного отбора мощности подразумевает выполнение достаточно трудоемких вычислений даже в случае трехпроводной линии, оценка же функционирования антенны, подвешенной к опорам шестипроводной (двухцепной) ЛЭП, требует вывода более сложных выражений и дополнительных затрат времени. Подобный подход являлся безальтернативным при отсутствии цифровой вычислительной техники, однако наличие современных компьютерных программ инженерного анализа и численного моделирования методом конечных элементов предоставляет новые возможности для быстрого решения широкого класса электромагнитных, тепловых и механических задач.

В связи с этим вызывает определенный интерес применение отечественного программного комплекса Elcut (внесен в Реестр российского программного обеспечения) с целью расчета антенного отбора мощности для организации питания ЗОМ и ЗОП

¹ Соответствует требованиям приложения № 22 [1] для отнесения его к заградительным огням малой интенсивности категории А.

КОМПОНОВКА УСТРОЙСТВА СВЕТООГРАЖДЕНИЯ НА ОПОРЕ П110-6 (РАЗМЕРЫ В МЕТРАХ)

Рис. 1



Обозначения: А1 — батарейный блок питания; А3 — блок управления и питания ламп; узел А — блок ламп (А5, А7 — светильники ЗОП, А6, А8 — светильники ЗОП с фотореле).

(при подвеске антенны в одном из пролетов двухцепной ВЛ 110 кВ Нижнеисетская — Авиатор) и сопоставление полученных результатов с данными, приводимыми В.Д. Юренковым в [7] в отношении мощностной характеристики емкостного отбора.

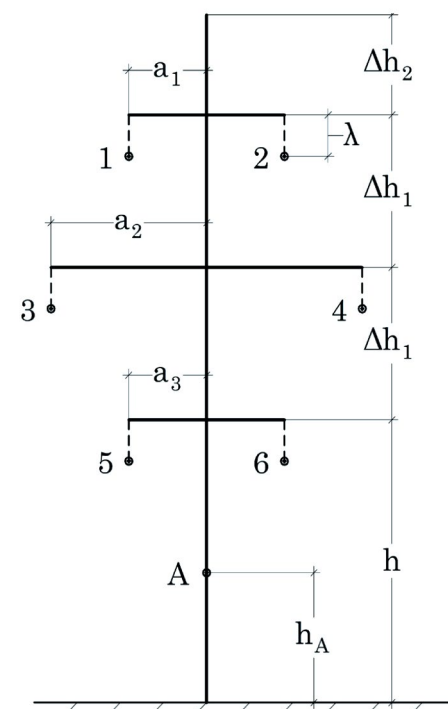
Заметим, что в целом схожий расчет, относящийся к классу плоскопараллельных задач электрического поля переменных токов, а именно определение наиболее благоприятного места подвеса оптического кабеля на опорах ВЛ 110 кВ и выше, заявлен компанией-разработчиком Elcut в качестве типового и размещен в соответствующей галерее примеров [8].

В качестве исходных данных для расчета зададимся следующими параметрами:

- изолированная от земли антенна подвешивается на опоре П110-6 (геометрические параметры опоры П110-6 с антенной приведены на рис. 2), подвес антенны на изоляторах выполняется на 3 м ниже нижнего яруса проводов, что допустимо согласно ПУЭ [9];
- принимается осевая симметрия фазировки двухцепной линии: верхний ярус проводов А1 (1), А2 (2), средний — В1 (3), В2 (4), нижний — С1 (5), С2 (6);
- провод А антенны выбирается аналогичным фазным — АС-240/39;
- длина гирлянды изоляторов $\lambda = 1,3$ м;

ГЕОМЕТРИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ И АНТЕННЫ ЕМКОСТНОГО ОТБОРА: $h_A = 16$ М, $h = 19$ М, $\Delta h_1 = 6$ М, $\Delta h_2 = 4$ М, $h_A = 16$ М, $a_1 = a_3 = 2,1$ М, $a_2 = 4,2$ М

Рис. 2



- глубина моделирования $l_z = 200$ м соответствует средней длине промежуточных пролетов на ВЛ Нижнеисетская — Авиатор.

Кроме того, введем допущения об идеальном равнинном рельефе местности, отсутствии на участке линии грозозащитного троса (замененного на ограничители перенапряжения) и отсутствии какого-либо влияния опор на картину электрического поля ВЛ.

Таким образом, получим изображенную на рис. 3 картину электрического поля анализируемой ВЛ, а именно цветовую карту распределения действующего значения наводимого напряжения в поперечной плоскости пролета с отображением эквипотенциальных кривых — линий, получен-

ных при пересечении эквипотенциальных поверхностей с плоскостью графического изображения поля (Elcut допускает несколько видов отображения картины поля: в виде иллюстраций распределения мгновенного, действующего, амплитудного значений напряженности поля или наводимого напряжения). Соответственно распределение наводимого напряжения по всей высоте опоры иллюстрируется графиком (рис. 4). Как видно, при подвесе антенны на уровне $h_A = 16$ м действующее значение наводимого напряжения составит $U_A = 23,11$ кВ.

Нетрудно заметить, что данный расчет выполнен по высшей точке подвеса проводов на опоре, т. е. с не упомянутым выше допущением об отсутствии провисания проводов (и антенны) в пролете. Следовательно, необходимо оценить влияние провисания, для чего требуется определить эквивалентную высоту подвеса каждого провода линии и антенны (данная величина вводится в [7]) с целью замены провисающих проводников прямолинейными, но подвешенными на высоте, обеспечивающей эквивалентность их электростатического влияния. Эквивалентная высота подвеса провода h_3 вычисляется по формуле [7]

$$h_3 = h \cdot e^{-0,67f/h}, \quad (1)$$

где h — высота подвеса реального провода к опоре, м;

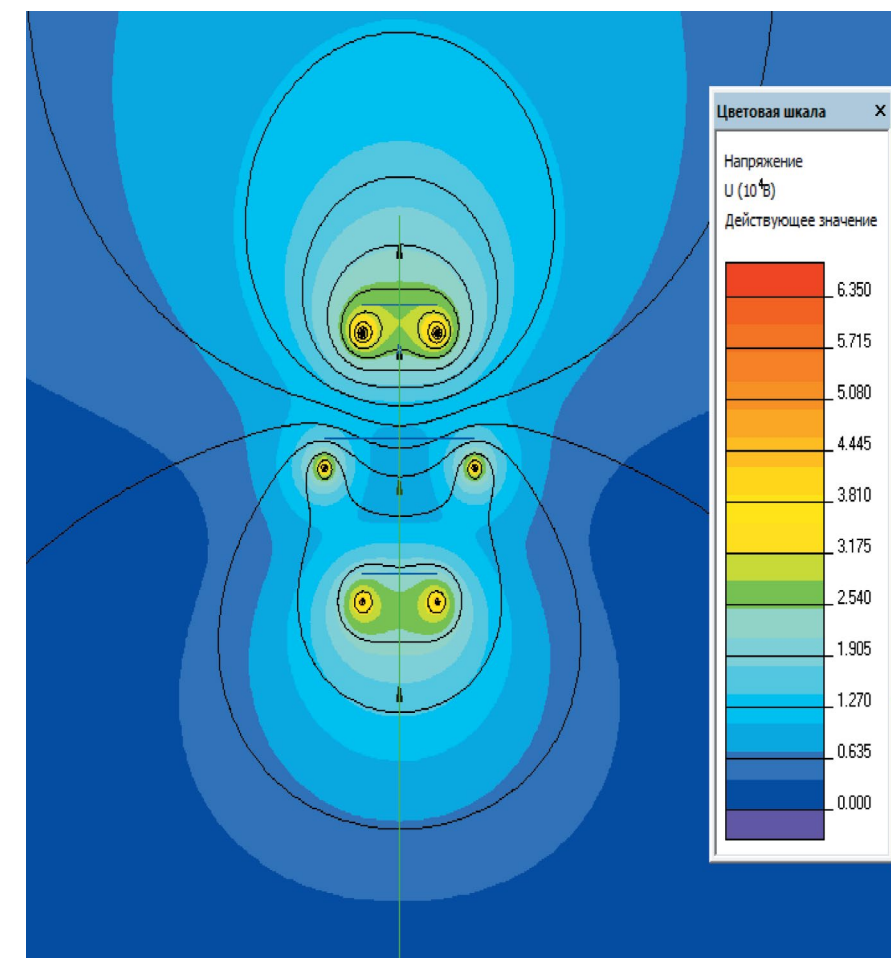
f — стрела провисания провода, м.

Таким образом, для вычисления параметров отличающейся от приводимой на рис. 2 геометрии расположения проводов и антенны зададимся дополнительными начальными условиями:

- местность, по которой проходит линия, населенная, габарит ВЛ $\Gamma = 8$ м (согласно ПУЭ, не менее 7 м), стрелы провисания проводов

КАРТИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ (ЦВЕТОВАЯ КАРТА ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ С ОТОБРАЖЕНИЕМ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КРИВЫХ) АНАЛИЗИРУЕМОЙ ВЛ В СРЕДЕ ELCUT

Рис. 3



всех ярусов одинаковы (и равны $f = h - \Gamma$, т. е. 11 м);

- габарит провода антенны напряжением менее 35 кВ $\Gamma_A = 7$ м (что соответствует стреле провисания антенны $f_A = h_A - \Gamma_A$, т. е. 9 м).

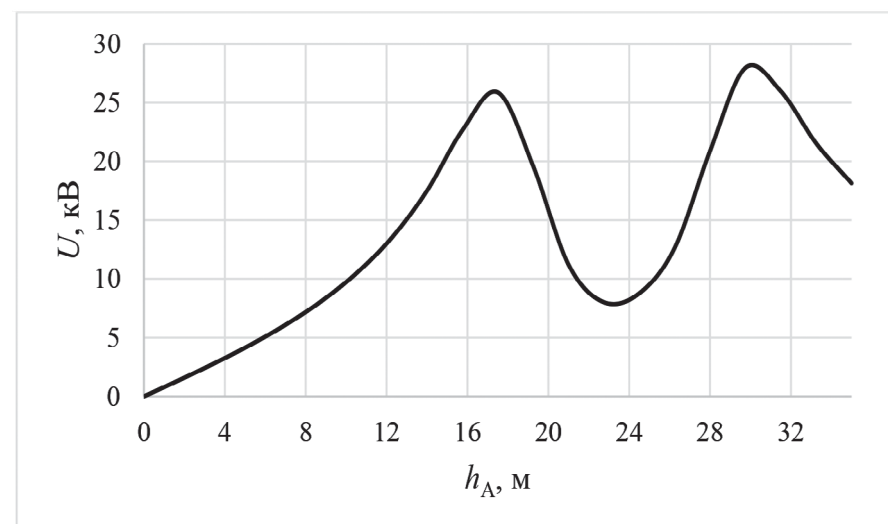
Руководствуясь этими соображениями, по формуле (1) получим значения высот подвеса эквивалентных прямолинейных проводов 1-6 и антенны «А» ($h_{31} = h_{32} = 24,441$ м, $h_{33} = h_{34} = 18,617$ м, $h_{35} = h_{36} = 12,891$ м и $h_{3A} = 10,094$ м) и выполним ана-

логичный произведенному ранее расчет наводимого на антенне напряжения с учетом провисания всех проводников. По аналогии с предыдущим расчетом полученные результаты отразим на соответствующих графических изображениях распределения наводимого напряжения (рис. 5, 6).

Как видно из рис. 6, для высоты подвеса антенны h_{3A} значение наводимого напряжения составит $U_A = 21,7$ кВ. Сравним это значение с величиной, полученной при расчете

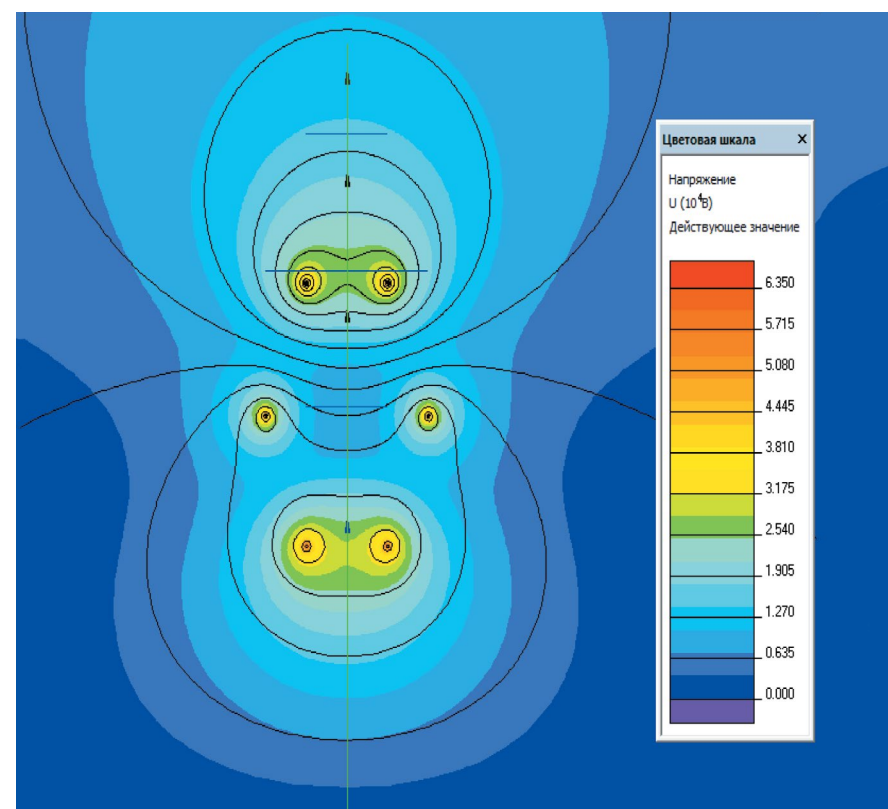
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ ОПОР ВЛ

Рис. 4



КАРТИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ (ЦВЕТОВАЯ КАРТА ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ С ОТОБРАЖЕНИЕМ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КРИВЫХ) АНАЛИЗИРУЕМОЙ ВЛ В СРЕДЕ ELCUT ПРИ РАСЧЕТЕ С УЧЕТОМ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДОВ

Рис. 5



по высшей точке подвеса проводов и антенны ($U_A = 23,11$ кВ), можем констатировать, что вызванное неучетом провисания проводов отклонение значения напряжения составляет не более 6,5%, что в целом можно считать приемлемым для расчета, призванного выяснить порядок снимаемой с антенны мощности и общую конфигурацию установки емкостного отбора.

Далее, решая задачу электростатики с геометрией расположения проводов и антенны согласно расчету с подвесом эквивалентных прямолинейных проводов и антенны, при помощи встроенного калькулятора матрицы емкостей CMatrix находим частичные емкости между проводами 1–6 и антенной «А» ($C_{A1} = C_{A2} = 3,27 \cdot 10^{-11}$ Ф, $C_{A3} = C_{A4} = 5,70 \cdot 10^{-11}$ Ф, $C_{A5} = C_{A6} = 1,41 \cdot 10^{-10}$ Ф), а также емкость антенны $C_{AA} = 6,47 \cdot 10^{-10}$ Ф. Эти значения можно использовать при составлении схемы замещения установки емкостного отбора мощности (рис. 7) и последующем анализе этой схемы посредством ее эмуляции в среде Multisim для выяснения возможности электропитания системы светограждения.

Как видно из иллюстрации работы схемы (рис. 7), при подключении линии к источникам ЭДС 110 кВ $E1$ и $E2$, $E3$ и $E4$, $E5$ и $E6$ (образующих трехфазную систему ЭДС со сдвигом на $0, -120^\circ, 120^\circ$ соответственно) генерируемое на антенне напряжение составляет 21,03 кВ, что различается с полученным в Elcut значением $U_A = 21,7$ кВ не более чем на 3,09% и свидетельствует о правильности выполненных ранее расчетов.

С учетом величины наводимого напряжения среди всей номенклатуры серийно изготавливаемых трансформаторов наиболее подходящим выглядит применение однофазного трансформатора с литой изоляцией ОЛЗ-0,63/27,5 со следующими характеристиками: ток холостого

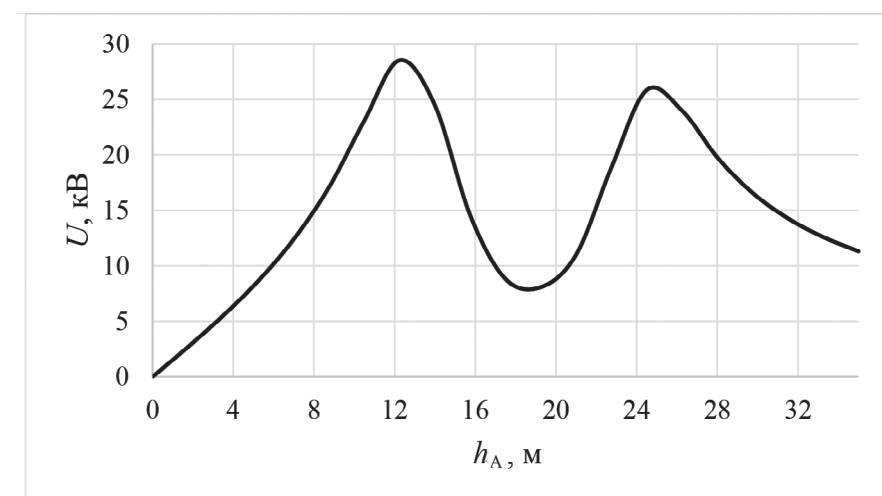
хода не более 30% от номинального, потери холостого хода 40 Вт, напряжение короткого замыкания 3,8% от номинального, потери короткого замыкания 55 Вт, номинальное напряжение вторичной обмотки 218 В. Схема установки емкостного отбора мощности, приведенная на рис. 7, содержит Г-образную схему замещения двухобмоточного трансформатора, параметры которой — активное R_{ct} и реактивное X_{ct} сопротивления ветви намагничивания, сопротивления обмоток $R_{обм}$ и $X_{обм}$, высшее и низшее напряжения идеального трансформатора T получены, исходя из обозначенных выше технических характеристик трансформатора ОЛЗ-0,63/27,5, в том числе по стандартным, известным из курса электротехники формулам для расчета параметров схем замещения трансформаторов (с целью использования Multisim в ветви намагничивания проводимости заменены сопротивлениями, а для катушек индуктивности указываются не сопротивления, а индуктивности L_{ct} и $L_{обм}$).

Эмулируя работу схемы на нагрузку в виде лампы мощностью 2,08 Вт (мощности, потребляемой системой светограждения на ВЛ Нижнеисетская — Авиатор), отчетливо видно ее яркое свечение. При переключении схемы для работы на нагрузку в виде резистора сопротивлением 1 кОм можем зафиксировать ток 151,1 мА, что соответствует величине отбираемой мощности на уровне 22,83 Вт. Полученный результат довольно хорошо коррелируется с данными, приводимыми В.Д. Юренковым в [7], согласно которым при использовании на двухцепных ВЛ 110 кВ в качестве антенны грозозащитного троса получаемая посредством емкостного отбора мощность, как правило, не превышает 150–160 Вт/км, т.е. 30–32 Вт/200 м.

Резюмируя все сказанное, можем сделать вывод, что генерируемая

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ ОПОР ВЛ ПРИ РАСЧЕТЕ С УЧЕТОМ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДОВ

Рис. 6



на антенне в пролете 200 м (средняя длина пролета на выбранном участке) мощность достаточна для питания ЗОМ.

Б. «РЕЗИСТИВНЫЙ» ОТБОР МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВЛЕННОГО В ПОДВЕСКУ ИЗОЛЯТОРОВ РЕЗИСТОРА

Одним из возможных вариантов организации питания ЗОМ является «резистивный» отбор мощности. Идея заключается в установке дополнительного изолятора с шунтом из высокоомного резистора, к концам которого подключается понижающий трансформатор. Резистор выбирается таким образом, чтобы на нем было падение напряжения около 2–2,5 кВ в условиях увлажнения загрязнений на поверхности гирлянды. Трансформатор выбирается на это же напряжение.

Выработка устройства ограничивается током утечки через гирлянду, который зависит от степени загрязнения изоляции. Исследования [10], включая результаты реальных замеров токов утечки высоковольтных ВЛ (рис. 8), показывают, что ток утечки

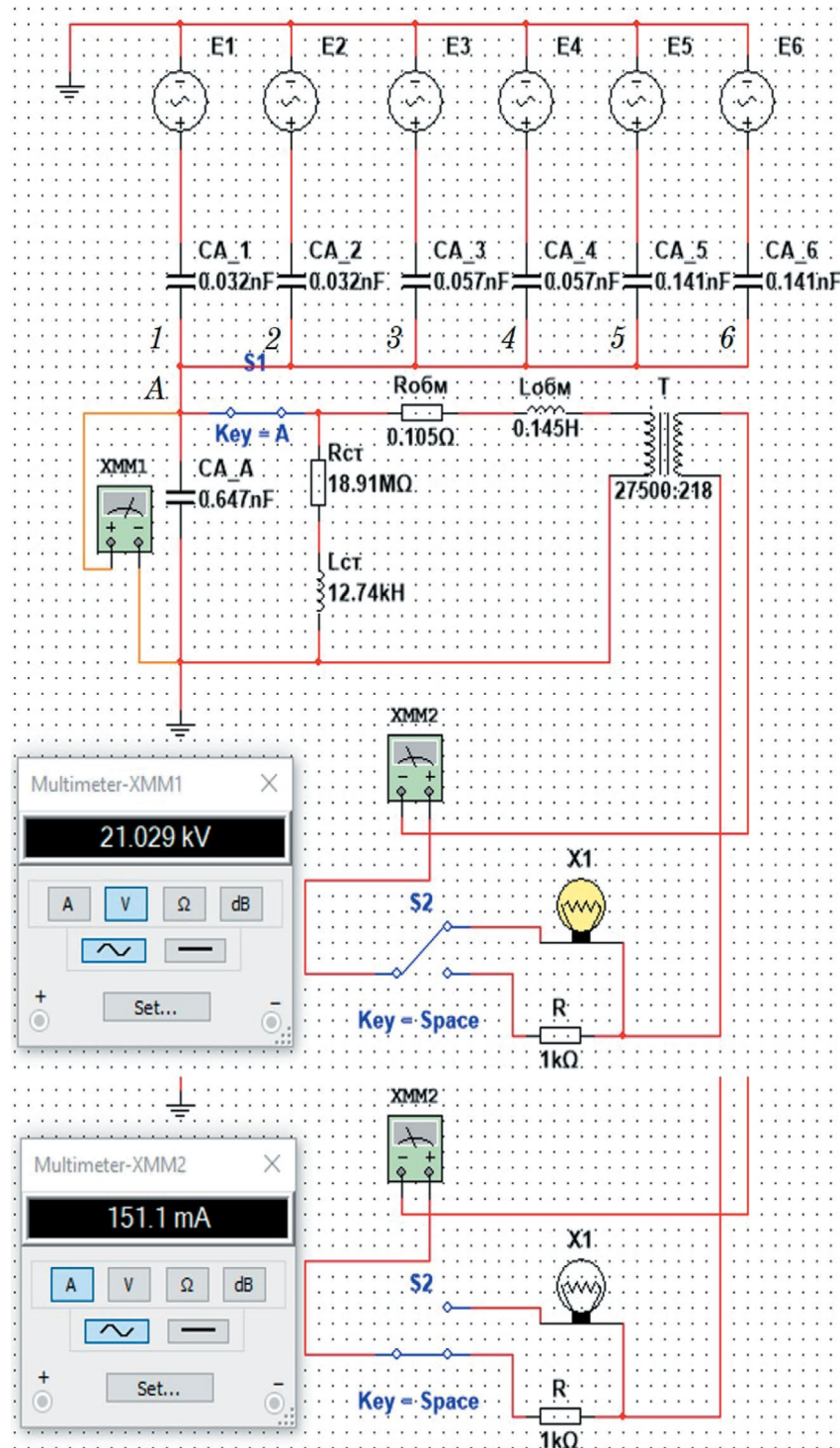
в гирлянде 110 кВ из семи изоляторов колеблется вокруг 10 мкА — 10 мА в зависимости от степени загрязнения.

Таким образом, мощность на входе трансформатора теоретически может краткосрочно возрастать до 25 Вт, но в среднем будет колебаться около 0,1–0,5 Вт с одной фазы. Это подтверждается моделированием, выполненным с применением программного комплекса Multisim (рис. 9) на основе типичной схемы замещения гирлянды изоляторов (приводимой, например, в [11]) с учетом типичных (средних) значений емкостей $C0...$ — собственной емкости изолятора тарельчатого типа (50–70 пФ), $C1...$ — емкости изолятора по отношению к земле (4–5 пФ), $C2...$ — емкости изолятора по отношению к проводу (0,5–1 пФ). Так, при величине сопротивления резистора $R = 12$ МОм падение напряжения составит 2,23 кВ, что при токе утечки 188,26 мкА обеспечит мощность около 0,42 Вт.

Авторам статьи пока не известны полные аналоги реализации данной идеи.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ УСТАНОВКИ ЕМКОСТНОГО ОТБОРА МОЩНОСТИ И ЕЕ ЭМУЛЯЦИЯ В СРЕДЕ MULTISIM ПРИ РАБОТЕ НА НАГРУЗКУ В ВИДЕ ЛАМПЫ ИЛИ РЕЗИСТОРА

Рис. 7



В. ЗАРЯД АККУМУЛЯТОРОВ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Традиционная для систем мониторинга гололедообразования и других автономных электротехнических комплексов, установленных на опорах ВЛ, система питания «АКБ + солнечные панели» может быть применена и для ЗОМ. Дополнительно может быть предусмотрена система удаленного контроля на базе GSM-4G, которая позволит своевременно выявить неисправность солнечной панели или разряд аккумулятора.

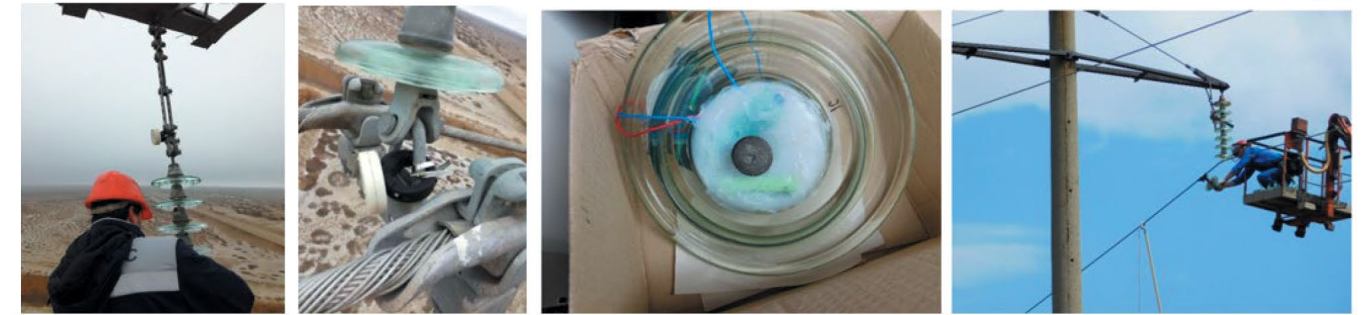
Исходя из данных метеорологических наблюдений [12], а также информации, накопленной АО «ЕЭСК» в ходе эксплуатации систем светоосаждения ЛЭП на Урале, были получены результаты оценочного расчета мощности солнечной панели, установленной в Екатеринбурге и необходимой для гарантированного восполнения энергии, расходуемой на питание ЗОМ в течение года (табл. 1).

К полученной величине мощности солнечной панели 80 Вт необходимо применить поправочные коэффициенты, приводимые, в частности, в [13, 14], учитывающие снижение энергоэффективности солнечной панели при изменении угла освещения (0,7); КПД аккумуляторов, тепловые потери (0,8); запас на преобразование напряжения в цепи (0,8). Тогда расчетная мощность солнечной панели составит $80 \text{ Вт} \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 178 \text{ Вт}$.

С учетом данных графы «Потребление ЗОМ в месяц, Вт·ч» (см. табл. 1) требуемая буферная емкость составляет 322 А·ч. Для расчета суммарной требуемой емкости аккумуляторов предлагается принять резерв емкости, равный трехкратной буферной емкости, а также применить понижающий коэффициент 2, отражающий снижение емкости аккумуляторов в течение заявленного срока службы пять лет. Итоговая требуемая емкость составит 1932 А·ч.

ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ В МЭС ЮГА (ДАГЕСТАН) И «ВОЛГОГРАДЭНЕРГО» (2017–2018 ГГ.)

Рис. 8



Для установки могут быть рассмотрены аккумуляторы со сроком службы до 10–15 лет: свинцово-кислотные серии GX 12, литий-титановые или литий-железофосфатные.

Г. ИНДУКТИВНЫЙ ОТБОР МОЩНОСТИ С СЕРДЕЧНИКОМ И БЕЗ НЕГО

Устройство бесконтактного отбора мощности с индуктивной связью (УОМ) содержит замкнутый магнитопровод тороидальной формы, на котором размещена обмотка и в центральное отверстие которого пропущен фазный провод. Принцип действия близок принципу действия трансформатора тока с замкнутой на нагрузку вторичной обмоткой.

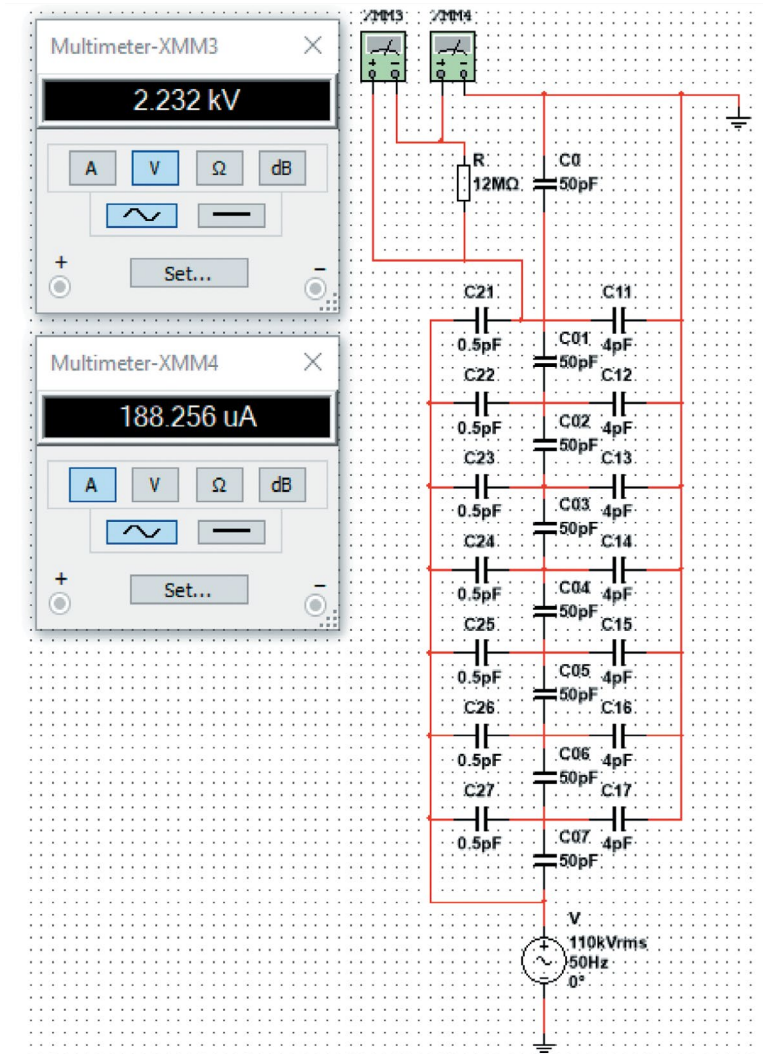
Наиболее критичным режимом эксплуатации ЗОП на ВЛ являются зимние периоды времени года. Для широты расположения ВЛ 110 кВ Нижнеисетская — Авиатор минимальная продолжительность светового дня наблюдается 21 декабря, $T_{\text{ночи}} = 17,4$ часа. Минимальная выработка мощности для устройства питания, необходимая для зарядки аккумулятора ЗОП, определяется по формуле

$$P_{\text{н min}} = \frac{T_{\text{ночи}}}{24} \cdot P_{\text{н}}$$

Исходя из данных о токовых режимах, средняя сила тока на ВЛ в декабре 2019 г. составила 64 А. Таким образом, удельная выработка

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА «РЕЗИСТИВНОГО» ОТБОРА МОЩНОСТИ, РЕАЛИЗОВАННАЯ В СРЕДЕ MULTISIM

Рис. 9



ВЫБОР МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Таблица 1

Месяц	Продолжительность солнечного свечения в месяц, ч	Время работы ЗОМ в месяц, ч	Потребление ЗОМ в месяц, Вт·ч	Требуемая средняя эффективная мощность солнечной батареи, Вт
Январь	28,5	511,5	1534,5	54
Февраль	24	406	1218	51
Март	14	372	1116	80
Апрель	64	300	900	14
Май	272	248	744	3
Июнь	255	210	630	2
Июль	240	217	651	3
Август	216	279	837	4
Сентябрь	110	360	1080	10
Октябрь	48	434	1302	27
Ноябрь	30	480	1440	48
Декабрь	144	558	1674	12
Итого за год	1445,5	4375,5	13126,5	80 (максимум)

мощности устройства питания должна составлять не менее 22,6 мВт на 1 А тока в фазном проводе ВЛ.

Для стабилизации напряжения на нагрузке применяется линейный стабилизатор, потеря напряжения на котором U_c не превышает 1,5 В. Напряжение перед выпрямителем:

$$U_2 = (U_d + n_d \cdot U_{np}) \cdot k_u, \quad (2)$$

где n_d — число последовательно включенных диодов в выпрямителе, 2 шт;

U_d — напряжение выпрямителя, В;

U_{np} — среднее прямое падение напряжения на диоде, 0,90 В;

k_u — отношение переменного напряжения к выпрямленному, 1,11.

Сила тока перед выпрямителем:

$$I_2 = I_d \cdot k_i, \quad (3)$$

где k_i — коэффициент изменения силы тока после выпрямителя, 1,11;

I_d — ток после выпрямителя, А.

Мощность перед выпрямителем:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2, \quad (4)$$

Для расчета геометрических параметров магнитопровода определяется его минимальный внутренний диаметр из условия установки устройства на провод АС 240/39 диаметром 21,6 мм, зазора для размещения обмотки, толщины внешнего изоляционного слоя обмотки и толщины корпуса устройства. По вычисленному внутреннему диаметру сердечника определяется площадь окна магнитопровода.

Для расчета оптимальной толщины магнитопровода вычисляют произведение площади поперечного сечения магнитопровода и площади окна в нем:

$$S_{ок} \cdot S_{мп} = \frac{P_2 \cdot (1 + \eta_{тр}) \cdot 100}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot j \cdot \eta_{тр} \cdot k_m \cdot k_{ст}}, \quad (5)$$

где $\eta_{тр}$ — КПД трансформатора, 0,9;

B_m — магнитная индукция в магнитопроводе, Тл;

j — допустимая плотность тока в обмотках, 2,0 А/мм²;

k_m — коэффициент заполнения окна медью, 0,2;

$k_{ст}$ — коэффициент заполнения сердечника сталью, 0,9.

Внешний диаметр сердечника D вычисляется по формуле:

$$D = 2 \sqrt{\frac{S_{ок} + S_{мп}}{\pi}}. \quad (6)$$

По рассчитанному габаритным диаметрам магнитопровода определяется толщина его стенки $h_{мп} = D - d$.

Площадь сечения стенки тороидального магнитопровода в плоскости провода ВЛ:

$$S_{ст} = \frac{D-d}{2} \cdot b \cdot k_{ст}, \quad (7)$$

где b — высота тороидального магнитопровода, 0,9.

Число витков вторичной обмотки с нагрузкой постоянного тока определяется соотношением

$$W = \frac{1,05 \cdot (U_d + n_d \cdot U_{np}) \cdot k_u \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot S_{ст} \cdot B_m}. \quad (8)$$

Минимальный диаметр проволоки обмотки определяется согласно [15]:

$$d_{п} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I_2}{j}}. \quad (9)$$

По рассчитанному $d_{п}$ выбирается стандартная проволока по [16].

Отсюда вычисляются потери мощности в обмотке:

$$P_{обм} = \frac{8 \cdot I_2^2 \cdot W \cdot p \cdot (b + D - d)}{\pi \cdot D_{пров}^2}. \quad (10)$$

Потери в электротехнической стали вычисляются по приближенной формуле:

$$P_{ст} = K_{сб} \cdot P_{10/50} \cdot \left(\frac{B_m}{10}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot V_{мп} \cdot \gamma_{ст}, \quad (11)$$

где $K_{сб}$ — коэффициент, учитывающий увеличение потерь, связанных с технологией изготовления и сборки магнитопровода;

$P_{10/50}$ — удельные потери, нормированные на индукцию 1 Тл и частоту 50 Гц, Вт/кг;

$V_{мп}$ — объем магнитопровода ($V_{мп} = (\pi \cdot b)/4 \cdot (D^2 - d^2)$), м³;

$\gamma_{ст}$ — плотность электротехнической стали, кг/м³.

Электродвижущая сила во вторичной обмотке:

$$E = \frac{4,44 \cdot f \cdot W \cdot S_{ст} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot I_1^2}{l_{ср}}, \quad (12)$$

где $l_{ср}$ — расстояние от центра провода ВЛ до середины магнитопровода ($l_{ср} = (D + d)/2$);

μ — относительная магнитная проницаемость.

Индуктивность катушки обмотки определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot W^2 \cdot S_{ст} \cdot k_{ст}}{l_{ср}}. \quad (13)$$

Полное сопротивление катушки:

$$Z_k = \sqrt{R_{обм}^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)^2}. \quad (14)$$

Полное сопротивление контура:

$$Z = \sqrt{(R_{обм} + R_H)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)^2}, \quad (15)$$

где $R_H = U_H / I_H$ — активное сопротивление нагрузки.

Ток во вторичной обмотке:

$$I_2 = E / Z. \quad (16)$$

Сила тока на нагрузке:

$$I_H = I_2 / k_i, \quad (17)$$

Напряжение на нагрузке:

$$U_H = (E / k_i) - 1,5. \quad (18)$$

По полученному напряжению определяется мощность на полезной нагрузке:

$$P_H = I_H \cdot U_H. \quad (19)$$

Полученное значение мощности должно быть не менее целевого $P_{н min}$ и иметь запас для обеспечения бесперебойной работы ЗОП в условиях низкой средней токовой нагрузки на ВЛ и возможности отключения ВЛ на период до 48 часов.

Далее проверяется условие возможности размещения обмоток в окне магнитопровода по формуле:

$$S_o \cdot k_m \leq W \cdot \frac{d_{п}^2}{4}, \quad (20)$$

где S_o — площадь сечения окна магнитопровода, в которой предполагается размещение обмотки;

$d_{п}$ — минимальный диаметр проволоки в обмотке, величина которого вычисляется по (9).

Второй обязательной проверкой является оценка удельной поверхности охлаждения магнитопровода и обмотки по формуле:

$$S_{охл} = \frac{S_{охл}}{\Sigma P_{обм} + P_{ст}} \quad (21)$$

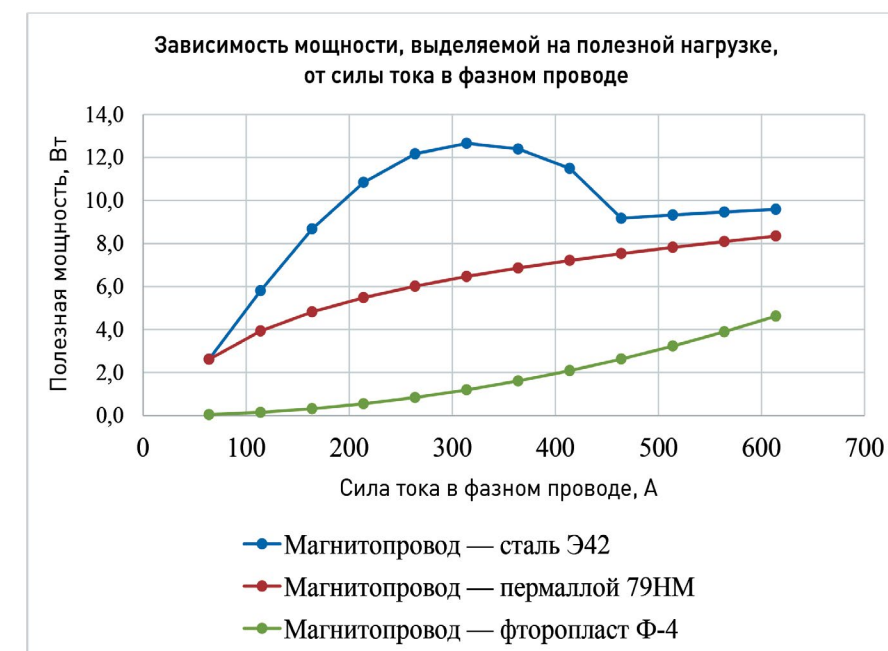
где $S_{охл}$ — площадь поверхности обмотки, через которую осуществляется конвективное охлаждение тороидального магнитопровода.

Допустимый перегрев обмоток (40–60 °С) обеспечивается в условиях естественной конвекции, если удельная поверхность охлаждения составляет не менее 18–20 см²/Вт.

Результаты расчетов зависимости мощности на полезной нагрузке от силы тока в фазном проводе представлены на рис. 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ НА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКЕ ОТ СИЛЫ ТОКА В ФАЗНОМ ПРОВОДЕ ДЛЯ УСТРОЙСТВ С РАЗНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Рис. 10



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ЗОМ

Таблица 2

Параметр	Емкостной отбор мощности	Резистивный отбор мощности	Солнечная панель на теле опоры
Технические особенности	Трансформатор ОЛЗ-0,63/27,5. Шкаф контроля и управления. Кронштейн с изоляторами. Провод-антенна АС-240/39: 200 м. Соединительный шлейф: около 20 м. Масса ¹ : около 200 кг	Дополнительный изолятор, шунтируемый нагрузкой. Шкаф контроля и управления и соединительные провода 6×26 м. Масса ¹ : около 50 кг. Устройство может использоваться для контроля загрязнения изоляторов	Солнечная панель BST 200-24 М: 150×45×30 см (с креплениями к опоре). Шкаф контроля и управления с соединительными проводами: до 20 м. Масса ¹ : около 40 кг. Система контроля заряда аккумуляторов — плата с микроконтроллером
Оценка стоимости устройства	Около 500 тыс. руб./устройство, включая 50 тыс. руб. — ОЛЗ-0,63/27,5; 50 тыс. руб. — автоматика и защита, 150 тыс. руб. — СМР	Около 150 тыс. руб./устройство, включая 60 тыс. руб. — СМР	Около 500 тыс. руб./устройство, включая 40 тыс. руб. — СМР
Срок эксплуатации ²	До 10 лет	До 10 лет	До 10 лет
Оценка срока окупаемости ³	6–7 лет	2 года	До 1,5 года

¹ На одну опору, включая массу шкафа контроля и управления.

² При условии замены аккумуляторов один раз в 5–7 лет.

³ С учетом сметной стоимости затрат на замену аккумуляторов. При условии успешности реализации технологии.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЗОП

Таблица 3

Параметр	Со стальным сердечником	С сердечником из пермаллоя	С сердечником из немагнитного материала
Габаритные размеры ¹ , см	15×3,7	25×6,99	100×22,66
Масса, кг	1	14	88
Оценка стоимости устройства	Около 100 тыс. руб./устройство, включая 40 тыс. руб. — СМР	Около 400 тыс. руб./устройство, включая 60 тыс. руб. — СМР	Около 200 тыс. руб./устройство, включая 40 тыс. руб. — СМР
Срок эксплуатации	До 10 лет	До 10 лет	До 10 лет
Оценка срока окупаемости	6–7 месяцев	2 года	До 1,5 года

¹ Длина магнитопровода вдоль провода × внешний диаметр, см.

Таким образом, выбранные параметры УОМ с металлическим сердечником (сталь, пермаллой) позволяют отбирать достаточно мощности для подзарядки аккумуляторов, а магнитопровод из ферромагнетика производит отбор только от 400 А в первичном проводе. Масса устройства без сердечника значительно превышает массу других устройств, что неприемлемо для установки под потенциал ВЛ. Возможно увеличение размеров магнитопроводов с увеличением выработки мощности.

Д. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ ПИТАНИЯ ЗОМ И ЗОП

В табл. 2 и 3 приведено сравнение основных технических характеристик систем питания ЗОМ и ЗОП соответственно.

Выводы

1. Приведены методики и результаты расчета основных параметров устройств питания огней светозащиты, устанавливаемых на вершине опоры ВЛ и на потенциале провода.

Выполнен расчет антенного отбора мощности от линии электропередачи, а именно определены величины наведенного на антенне напряжения и мощности емкостного отбора с применением Elcut — программы инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов, и программного комплекса Multisim. Полученные результаты достаточно хорошо коррелируются с данными аналитических расчетов В.Д. Юренкова, представленными в [7] (выдаваемая мощность отбора 22,83 Вт/200 м). В рамках рассмот-

рения емкостного отбора мощности выбран трансформатор для понижения напряжения на антенне с 21 кВ до напряжения нагрузки, представлены схема замещения соответствующей установки и иллюстрация эмуляции ее работы в среде Multisim.

Выявлено, что «резистивный» отбор мощности не может полностью восполнять заряд аккумуляторов, но позволяеткратно повысить срок автономной работы устройств светозащиты и может использоваться дополнительно для оценки рисков перекрытия изоляции по току утечки. Выполнено моделирование устройства «резистивного» отбора в среде Multisim посредством составления схемы замещения устройства и эмуляции ее работы. Результаты, полученные с учетом средних значений емкостных параметров изоляторов класса 110 кВ, подтверждают ожидаемые мощностные характеристики данного способа отбора.

Предложен альтернативный вариант с подзарядкой аккумуляторов от солнечной панели. Произведен расчет оптимальной мощности панели для климатических условий Екатеринбурга. Приведена методика электромагнитного расчета индуктивного отбора мощности. Подобраны оптимальный размер устройств с сердечниками из шихтованной стали, пермаллоя и немагнитных материалов; проведена проверка на достаточность выработки мощности при заданном токе в линии.

2. Даны оценки стоимости реализации вариантов. Наиболее затратным является вариант организации питания огней с помощью установки емкостного отбора мощности. Наименее затратными и наименее рискованными с технической точки зрения являются варианты электроснабжения ЗОП устройством отбора мощности индуктивного типа, ЗОМ — солнечной панелью. Срок окупаемости большинства вариантов менее 3–4 лет, что является приемлемым для энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

- Приказ Минтранса России от 25.08.2015 № 262 (ред. от 24.11.2017) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» (зарегистрировано в Минюсте России 09.10.2015 № 39264).
- Руководство по проектированию аэродромов. Ч. 4. Визуальные средства. 4-е изд. 2004. С. 218.
- РУЭСТОП ГА 95 «Руководство по электросветотехническому обеспечению полетов в гражданской авиации РФ».
- Приложение 14 к Конвенции о международной гражданской авиации. Т. I. Проектирование и эксплуатация аэродромов. 5-е изд-е. 2009. С. 352.
- СТО 34.01-2.2-016-2016. Маркеры для воздушных линий электропередачи. Маркировка опор и пролетов ВЛ.
- Проект. Шлейфовый заход ВЛ 110/10 кВ на ПС «Авиатор» от ВЛ-110 кВ Сибирская-Нижнеисетская. Световое ограждение. 2008. 05.068.07.00-338-26-ЭВ.
- Юренков В. Д. Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи. Электричество. Июль 1952 г. Москва. С. 32–41.
- Оптический кабель на опоре ЛЭП [Электронный ресурс]//ELCUT. Новый подход к моделированию полей. Режим доступа: http://elcut.ru/advanced/optical_cable_r.htm (Дата обращения: 16.01.2023).
- ПУЭ. Глава 2.5 «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ». 7-е изд., утв. 20.05.2003.
- Титов Д.Е., Волхов К.В., Кудрявцев А.А., Котливец В.В., Петренко С.А. К вопросу диагностики линейной изоляции//Электроснабжение. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 10–16.
- Борисоглебский П.В. Техника высоких напряжений. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.
- Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории Российской Федерации. М.: ОИВТ РАН, 2010.
- Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций.//Вестник Чувашского университета. 2013. № 3. С. 222–230.
- Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов. М.: РГУНГ, 2016.
- Найфельт Г.С. и др. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. М.: «РАДИО И СВЯЗЬ», 1985.
- ГОСТ 26615-85 «Провода обмоточные с эмалеовой изоляцией. Общие технические условия».



УМНЫЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ

СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ФСК ЕЭС

ЛИЧНО В РУКИ
ИНЖЕНЕРЫ

СЕТЕВЫЕ КОМПАНИИ
НИИ МРСК МЕНЕДЖЕРЫ

РОССЕТИ
МИНЭНЕРГО
ЦЕЛЕВАЯ РАССЫЛКА

РАН
СПЕЦИАЛИСТЫ
ГЛАВНЫЕ ИНЖЕНЕРЫ
СТУДЕНТЫ ВУЗЫ

ПРОИЗВОДИТЕЛИ
ОБОРУДОВАНИЯ
ЭНЕРГОХОЛДИНГИ
МЭС

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ
ПОСТАВЩИКИ ОБОРУДОВАНИЯ
ПМЭС
МОЛОДЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

РУКОВОДИТЕЛИ
ПРОЕКТИРОВЩИКИ