

6
A.60

обм. 27

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР**

Московский ордена Ленина Энергетический институт

Бун Тхон Зу

На правах рукописи

**ПАРАМЕТРЫ ГЛАВНОГО РАЗРЯДА МОЛНИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ
НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

(05.282 - Техника высоких напряжений)

Диссертация на русском языке

**Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва

1971

[Handwritten mark]

Введение

Для расчета числа отключений линий электропередачи необходимо знать, по крайней мере, четыре параметра молнии, а также связь между ними. Этими параметрами являются: максимальное значение тока, крутизна фронта, скорость распространения главного разряда и величина волнового сопротивления канала молнии.

К настоящему времени опубликованы многочисленные результаты измерений параметров молнии как в СССР, так и за рубежом. На основании этих данных составлены удобные для практического использования кривые статистической вероятности появления тех или иных значений амплитуды тока (I) и крутизны его фронта (a).

Ограниченные возможности использования быстродействующих электронных осциллографов не позволяют пока однозначно ответить на вопрос о корреляционной связи между ними.

В расчетах перенапряжений, основанных на общей теории электромагнитного поля с учетом запаздывания сигнала, скорость распространения главного канала молнии эмпирически берется в среднем равной 0,3 скорости света. Хотя это значение лежит в середине диапазона измеренных значений скорости, которая изменяется от 0,1 до 0,5 скорости света, но наблюдаемое замедление волнового процесса не получило должного физического обоснования.

В более неопределенном состоянии находится величина волнового сопротивления канала молнии. Исходя из аналогии канала молнии с металлическим проводом, многими авторами было пред-



ложено значение $Z = 300$ ом. В последнее время появилось предложение о больших значениях волнового сопротивления канала молнии, например: $Z = 3000$ ом. В литературе встречается даже значение $Z = 5000$ ом. При этом было высказано сомнение, можно ли вообще считать это сопротивление волновым.

В предложенных вариантах проекта Руководящих указаний по грозозащите электроустановок СССР также предлагаются различные значения Z . Такое положение не может удовлетворить инженеров-электриков, занимающихся вопросом грозозащиты электрических систем.

В данной работе сделана попытка, исходя из определенных соображений, составить расчетную модель канала молнии, на основании которой определяются необходимые расчетные параметры молнии. Для оценки степени правильности предложенной гипотезы может быть использовано сравнение результатов расчета с наблюдаемыми качественными и количественными характеристиками молнии. В качестве основных характеристик обратного разряда могут быть приняты ток молнии, переносимый в землю заряд и скорость распространения обратного разряда.

Изложено также объяснение явления замедления скорости главного разряда и дано более обоснованное значение волнового сопротивления для канала молнии, которое может быть непосредственно использовано в расчетах грозозащиты.

В первой главе "Общая постановка задачи. Обзор литературы по методике расчета грозоупорности линий электропередачи" дается характеристика интенсивности грозовой деятельности на территории Вьетнама.

Отмечается, что новые результаты регистраций длительности грозовой деятельности показывают, что территория ДРВ принадлежит к районам с особо интенсивной грозовой деятельностью. Например, в 1963 году были получены следующие числа грозовых дней и часов для 6 станций регистрации.

№ станц.	I	II	III	IV	V	VI
Н г.д.	135	158	115	91	151	162
Н г.ч.	492	663	553	413	913	1291

Другой особенностью является большая продолжительность грозового периода, который начинается в марте и кончается в ноябре, т.е. длится около 9 месяцев. Это приводит к тому, что с точки зрения грозозащиты линии электропередачи находятся в тяжелых условиях, т.к. в сухой сезон (октябрь и ноябрь) резко увеличивается удельное сопротивление грунта.

Средние рекомендуемые числа грозовых дней и часов для районов, где проходят трассы ЛЭП, соответственно равны (100+150) дней и 500 часов.

В разделе обзора литературы по методике расчета перенапряжения на линиях электропередачи дается краткий анализ постепенного усовершенствования математического аппарата расчетов. Отмечается, что методика расчета, основанная на общей теории электромагнитного поля наиболее полно учитывает явления, возникающие в линиях и в канале молнии при разряде, что приводит в конечном счете к удовлетворительному соответствию между расчетными и эксплуатационными числами отключений линий для большинства стран.

Однако применение этого метода расчета числа отключений для вьетнамских линий при подстановке упомянутых выше данных по длительности грозовой деятельности, дало число отключений намного превышающее эксплуатационные данные. Возможные причины расхождения между расчетными и эксплуатационными числами отключений линий можно разделить на 2 группы:

1. Числовые характеристики параметров молнии для рассматриваемых районов отличаются от тех исходных данных, которые берутся в основу расчета. Таковыми являются: кривые вероятностного распределения амплитуды тока $P(i)$ и крутизна фронта $P(a)$, удельная плотность разрядов на единичную поверхность земли при одном грозовом дне (или часе). В упомянутых выше расчетах эти числовые характеристики были взяты для ДРВ такими же, как и для стран с умеренным климатом. Вместе с тем имеющиеся немногочисленные данные говорят о том, что в странах с тропическим климатом процент разрядов молнии в землю сильно уменьшается, что должно сказываться на удельной поражаемости поверхности земли.

2. Возможная зависимость параметров молнии от сопротивления заземления поражаемого объекта. Для выяснения этого явления надо исследовать процесс главного разряда молнии и попытаться найти значение волнового сопротивления канала молнии. Решение этой задачи составляет основное содержание диссертации.

Во второй главе "Проверка некоторых гипотез по объяснению процесса главного разряда молнии" приводится ранее известное качественное объяснение замедления главного разряда,

а также численный расчет с целью проверить применимость этих гипотез к случаю разряда молнии.

Как известно, факт замедления волны заряда при главном разряде объясняется следующим образом: считается, что для преобразования лидерного канала в главный канал требуется определенное время, необходимое для перестройки участка канала, равного длине стрелы. На границе лидерного канала с главным каналом находится область сильного продольного электрического поля, под воздействием которого происходит интенсивная ударная ионизация, приводящая к резкому увеличению плотности ионов в плазме и к уменьшению градиента поля в ней. После этого область высоких градиентов передвигается на следующий участок, что эквивалентно движению стрелы. Такое объяснение не соответствует известным наблюдаемым явлениям молнии, например, снижению величины скорости при достижении больших высот и распространению главного разряда по ответвлениям с большей скоростью, чем по главному каналу молнии.

С другой стороны, многие авторы для объяснения замедления процесса главного разряда используют хорошо известный закон Теплера, на основании которого сопротивление лабораторной искры обратно пропорционально протекающему через нее заряду.

Чтобы проверить справедливость этого предположения была сделана попытка решить систему уравнений для канала молнии:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial i}{\partial x} + Gi + C \frac{\partial u}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

с условиями:

$$\left. \begin{aligned} G &= 0 \\ L &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$R = f(Q) = \frac{K}{\int_0^t i dt} \quad (3)$$

где Q - заряд, прошедший через рассматриваемый элемент,
 K - некоторый постоянный коэффициент.

Аналитически эта система уравнений не разрешима, поэтому она решалась численным способом на вычислительной машине БЭСМ-4. Расчеты показали, что такая модель дает плавное изменение проводимости всего канала молнии, т.е. вообще не позволяет выделить обратный разряд как отдельный процесс, развивающийся от земли к облаку. Поэтому закон Теплера использовался в несколько видоизмененной форме, которая обеспечивала бы резкий переход от лидерного разряда к главному.

Из рассмотрения соотношения градиентов и токов главного и лидерного канала можно написать:

$$R_{г.к.} \ll R_{л.к.} \quad (4)$$

где $R_{г.к.}$ и $R_{л.к.}$ - удельные сопротивления соответственно главного и лидерного каналов

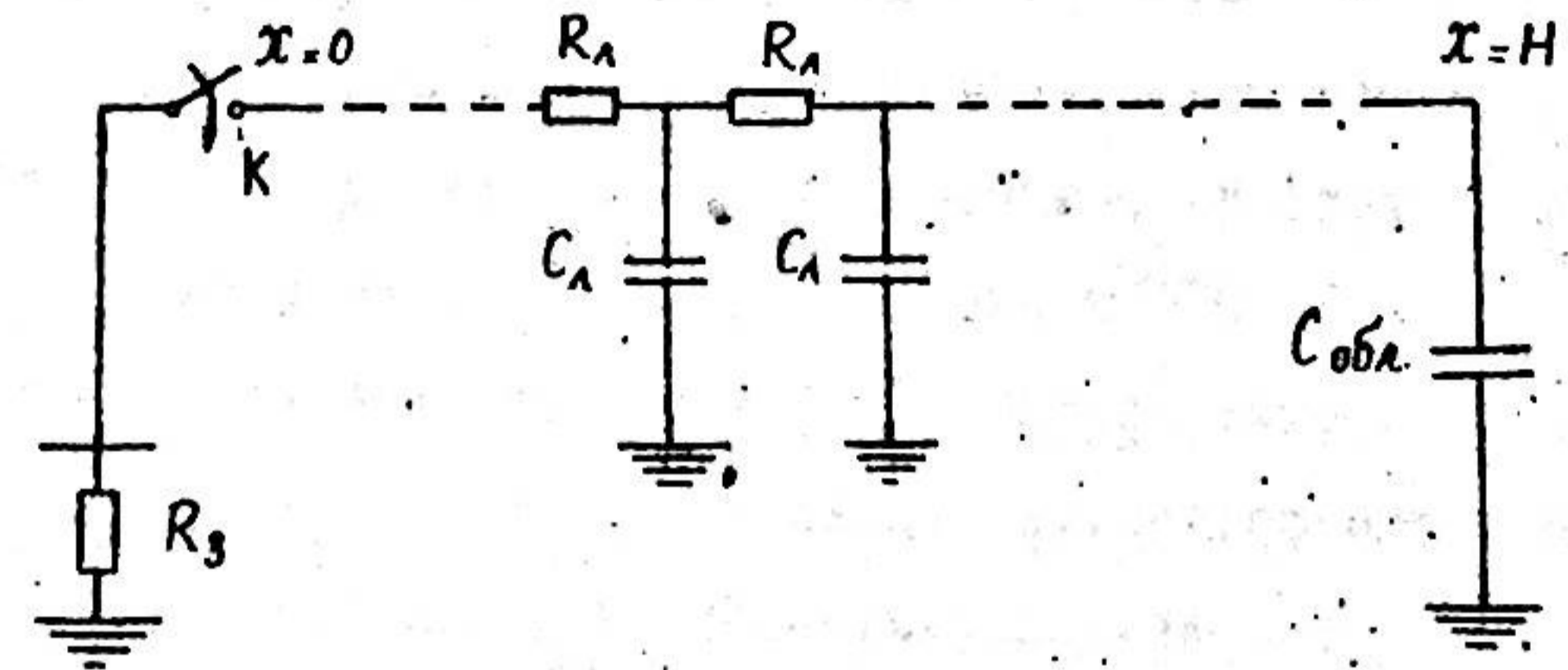
и поэтому можно пренебречь величиной $R_{г.к.}$ и падением напряжения на нем, т.е. считать потенциал главного канала равным потенциалу земли.

Математически это условие выглядит так:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_{л.к.} & \text{если} & \int_0^t i dt < Q_{кр} \\ R &= R_{г.к.} = 0 & \text{если} & \int_0^t i dt \geq Q_{кр} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $Q_{кр}$ - некоторый критический заряд. Одновременно с предложением эмпирической формулы (3) Теплер заметил, что для превращения нити разряда в ярко светящийся участок в условиях лабораторной искры необходимо протекание через данное сечение критического заряда $Q_{кр} = 3 \cdot 10^{-10}$ к. Иными словами, расчетная модель (5) в такой же степени соответствует закону Теплера, как и формула (3).

Схема и варианты расчета



Обозначения:

- R_3 - сопротивления заземления поражаемого объекта в расчете равны: 0, 10, 50 ом;
- H - высота облака;
- $C_{обл}$ - емкость облачного скопления зарядов;
- $R_{л}, C_{л}$ - удельные значения сопротивления и емкости лидерного канала.

Граничные условия расчета:

$$\text{при } x = 0 \quad u = i(t) R_3 \quad (6)$$

$$x = H \quad C_{обл} \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{x=H} = i_{x=H} \quad (7)$$

Начальное условие расчета:

при $t = 0$ $U_{t=0} = U(0, x)$

где

$U(0, x) = U_{обл} - \Delta U_A (H - x)$ (8)

при средней высоте $H = 2000$ м были взяты различные значения падения напряжения на единицу длины лидерного канала:

$\Delta U_A = 0; 50 \text{ в/см}; 1000 \text{ в/см}$

$U_{обл}$ - потенциал облачного скопления зарядов, принятый равным $10^8, 2 \cdot 10^8$ в.

Полученные результаты всех вариантов расчета показывают, что скорость распространения участка с большим током при $Q_{кр} = 3 \cdot 10^{-10}$ к очень велика и приближается к скорости света. Снижение скорости обратного разряда до 0,3 скорости света можно получить, только приняв значение критического заряда на несколько порядков больше, чем было получено Теплером для лабораторной искры.

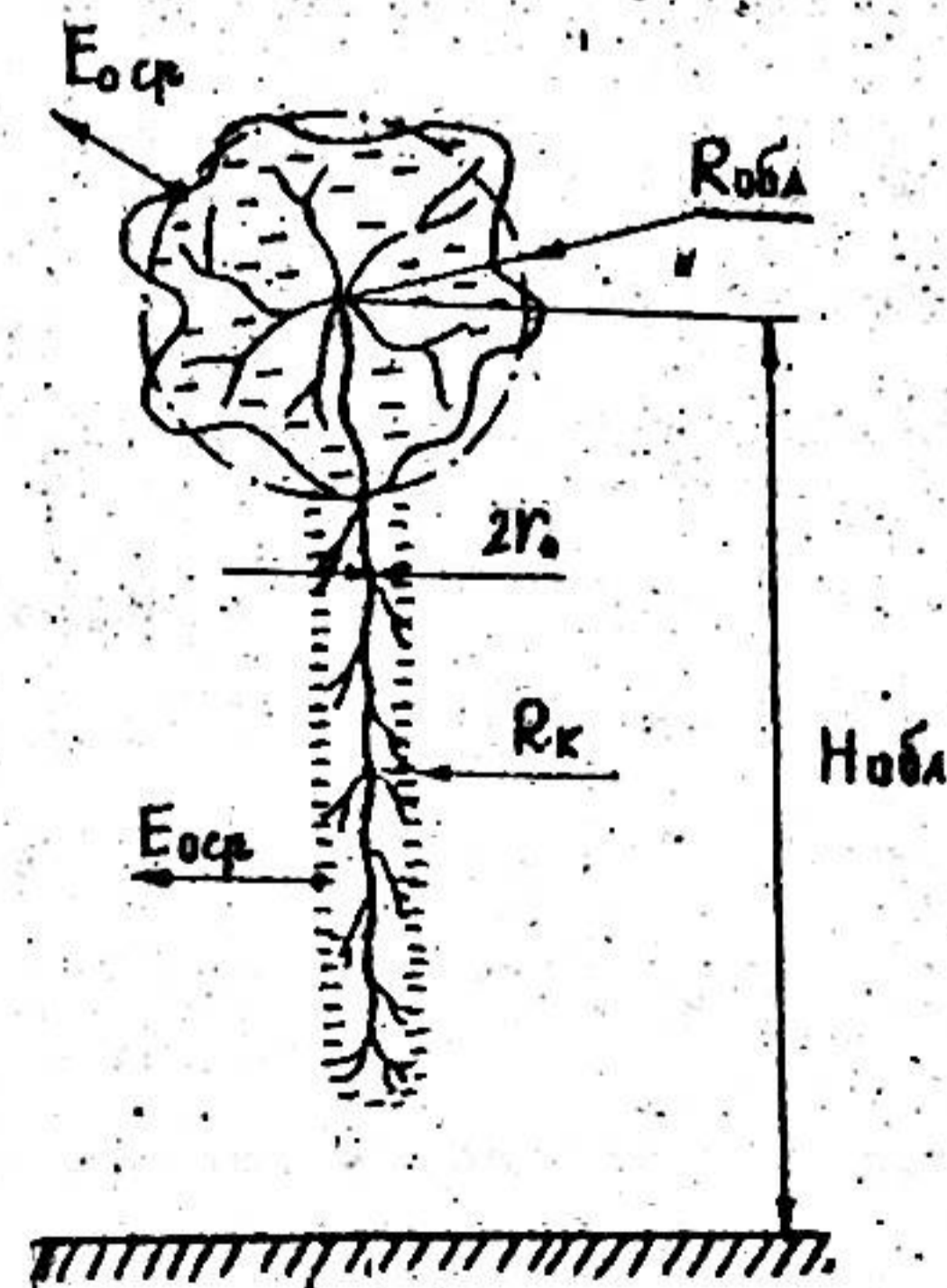
Все расчеты, проведенные при разных значениях критического заряда, показали, что ток в пораженном объекте очень мало зависит от сопротивления заземления, т.е. эквивалентное волновое сопротивление канала молнии должно быть в этом случае очень большим, примерно соответствующим величине, рекомендованной Вагнером, а процесс распространения обратного разряда имеет лишь кажущееся сходство с волновым процессом.

Однако, резкое различие величины критического заряда, удовлетворяющей опытным данным о скорости обратного разряда, и величины критического заряда, полученной Теплером для ла-

бораторной искры, убедительно свидетельствует о том, что в разряде молнии затраты энергии на снижение сопротивления канала составляют ничтожную долю общих потерь энергии и следует искать иных причин снижения скорости обратного разряда.

Последние данные показывают, что температура лидерного канала находится в пределах $20000 - 30000^\circ\text{K}$, так что канал лидера практически полностью ионизирован и обладает весьма высокой проводимостью. Поэтому нет оснований сомневаться в том, что распространение электромагнитного сигнала вдоль канала лидера должно иметь волновой характер, и снижение скорости этого сигнала должно происходить в рамках волнового процесса.

Возможные причины замедления процесса главного разряда излагаются в третьей главе "Расчетная модель канала молнии и определение ее параметров". В качестве исходной для дальнейших расчетов предлагается следующая картина для момента



перед началом возникновения главного разряда. Форма скопления зарядов в облаке для упрощения принимается шарообразной. Другие формы только усложняют, но не меняют ход дальнейших рассуждений и вычислений. Лидерный канал окружен зарядами, внедрившимися в пространство в процессе образования лидерного канала. Ввиду симметричности концы стримеров, по которым вытеснялся заряд в пространстве, образуют чехол цилиндрической формы.

Условия развития разряда таковы, что на концах стримеров, образующих поверхности воображаемых шара и цилиндра, должна существовать напряженность электрического поля, равная критической для воздуха. Но так как концы стримеров занимают не всю поверхность, а существуют в местах местного усиления поля, то усредненная напряженность $E_{0\text{ср}}$ по всей поверхности значительно меньше критической напряженности для воздуха E_n

$$E_{0\text{ср}} = K E_n \quad (9)$$

где $K < 1$ и определяются по методике сравнения упрощенной характеристики импульсной короны с экспериментальными. Тогда для скопления зарядов можно написать выражения для заряда:

$$Q_{\text{обл}} = 4\pi \epsilon_0 R_{\text{обл}}^2 E_{0\text{ср}} \quad (10)$$

для потенциала

$$U_{\text{обл}} = \frac{Q_{\text{обл}}}{4\pi \epsilon_0 R_{\text{обл}}} \quad (11)$$

и для средней объемной плотности распределения зарядов

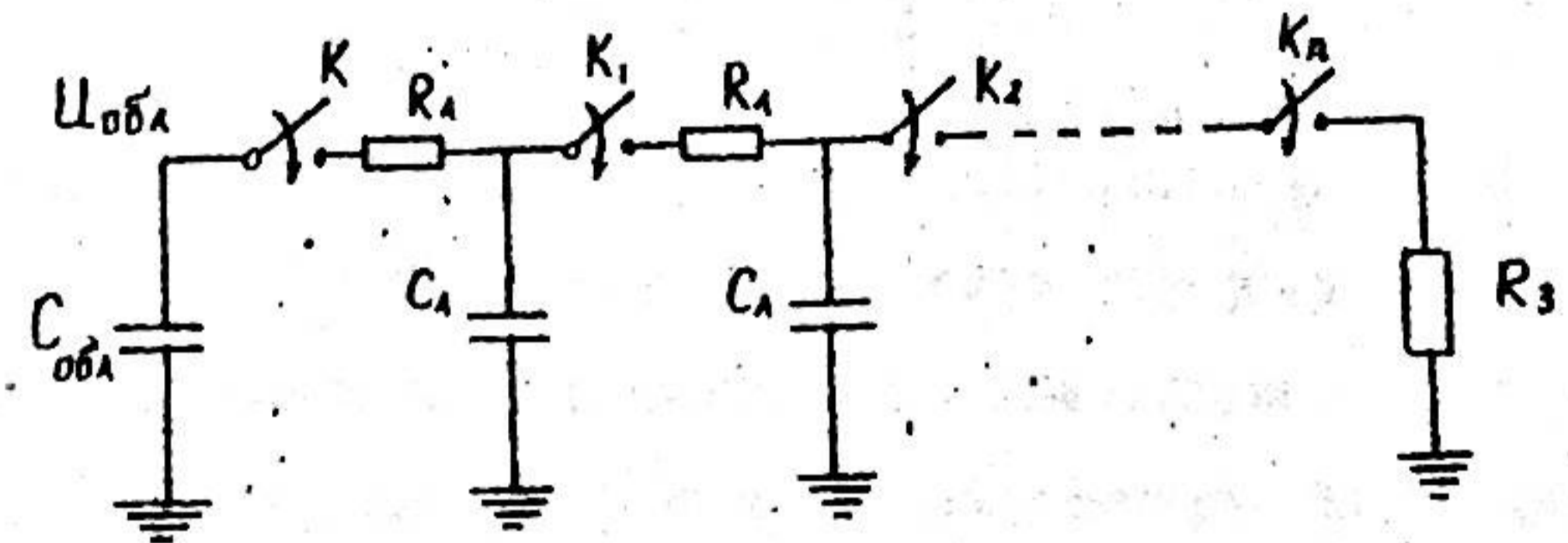
$$b_{\text{ср}} = \frac{3\epsilon_0 E_{0\text{ср}}}{R_{\text{обл}}} \quad (12)$$

Радиус коронного чехла вокруг лидерного канала определяется из выражения:

$$R_k = \frac{b_L}{2\pi \epsilon_0 E_{0\text{ср}}} \quad (13)$$

где b_L - линейная плотность зарядов лидерного канала.

Для определения распределения потенциала по лидерному каналу предложена цепочечная схема с последовательным включением элементарных ячеек, соответствующих средним параметрам одной ступени лидера первой компоненты. Интервалы времени между двумя включениями также берутся равными средней длительности паузы ступенчатого лидера ΔT .



Ориентируясь на средние величины, можно показать, что время ΔT в сотни раз больше постоянной времени одной ячейки. Это означает, что к моменту замыкания следующего рубильника в левой части уже прекратились переходные процессы и вся она находится под общим потенциалом.

Причины замедления движения обратного разряда.

По нашему мнению имеются 2 причины:

1) Поперечная обратная корона. При замыкании лидерного канала на землю на нем появляется волна положительного заряда, которая должна распространяться по внутреннему лидерному каналу со скоростью, близкой к скорости света.

В данном случае, в силу больших величин зарядов, следовательно, и значений радиальной напряженности поля, вокруг канала начинает развиваться интенсивный коронный разряд. Поэтому главный разряд молнии может рассматриваться как случай распространения волны по сильно коронирующей линии.

Как известно, в этом случае можно определить относительную фазовую скорость β :

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_g}}$$

v - скорость распространения волны при наличии короны;

c - скорость света;

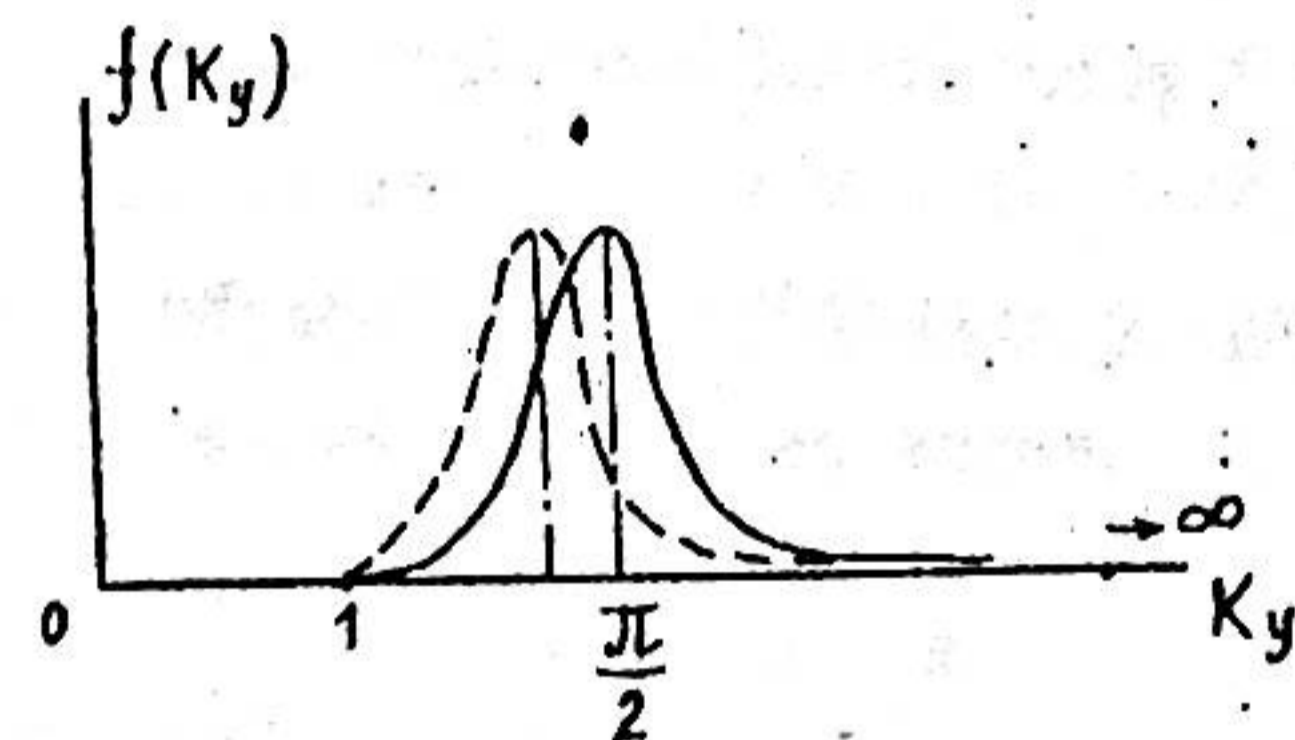
γ_g - коэффициент увеличения динамической емкости.

В результате математических преобразований можно получить минимальную фазовую скорость, равную:

$$\beta = \sqrt{\frac{\ln \frac{2H}{r_0} - 2}{\ln \frac{2H}{r_0} - 1}}$$

Результаты расчета показывают, что поперечная корона может дать ограничение скорости главного разряда до величины $(0,45 \div 0,6)$ скорости света.

2) Вторая причина малой величины измеряемой скорости главного разряда в том, что оптическими методами измеряется не истинная скорость, а кажущаяся скорость, которая меньше истинной из-за искривлений пути разряда. Искривление является естественным, т.к. каждый следующий пилот-стример развивается с конца образовавшегося лидера, и направление его является сугубо вероятностным. При принятии упрощающих допущений, что длина всех ступеней лидера одинакова и что угол между направлением стримера и вертикаль имеет равномерное распределение в пределах $0 - 180^\circ$, можно получить следующую кривую вероятностного распределения коэффициента удлинения K_y за счет искривления



Наиболее вероятное значение коэффициента удлинения находится около величины $\frac{\pi}{2} = 1,57$.

Если учесть, что искривления бывают двух родов:

- искривления в процессе развития лавин,
- искривления в процессе развития стримеров,

то грубо говоря, можно ожидать результирующий коэффициент удлинения за счет искривлений порядка $(\frac{\pi}{2})^2 \approx 2,5$.

В действительности мода кривой распределения смещается влево, так как всегда имеется преимущественное направление развития вниз (см. пунктирную кривую). Поэтому, действительный коэффициент удлинения канала должен быть меньше 2,5 и, по-видимому, имеет порядок 1,6 - 1,8. В таком случае, максимальная измеренная скорость обратного разряда определяется короной и должна иметь порядок 0,5 скорости света, средняя скорость имеет величину около 0,3 скорости света, а минимальная скорость может быть в несколько раз меньше средней, что и наблюдается в действительности. Однако, при этом следует иметь в виду, что во всех этих случаях истинная скорость обратного разряда изменяется в узких пределах и в среднем всего в 2 раза меньше скорости света.

Определение волнового сопротивления канала Z_k . Как в случае коронирующей линии, исходя из определений:

$$Z_k = \frac{U}{i}$$

и

$$Z_g = \frac{\partial U}{\partial i}$$

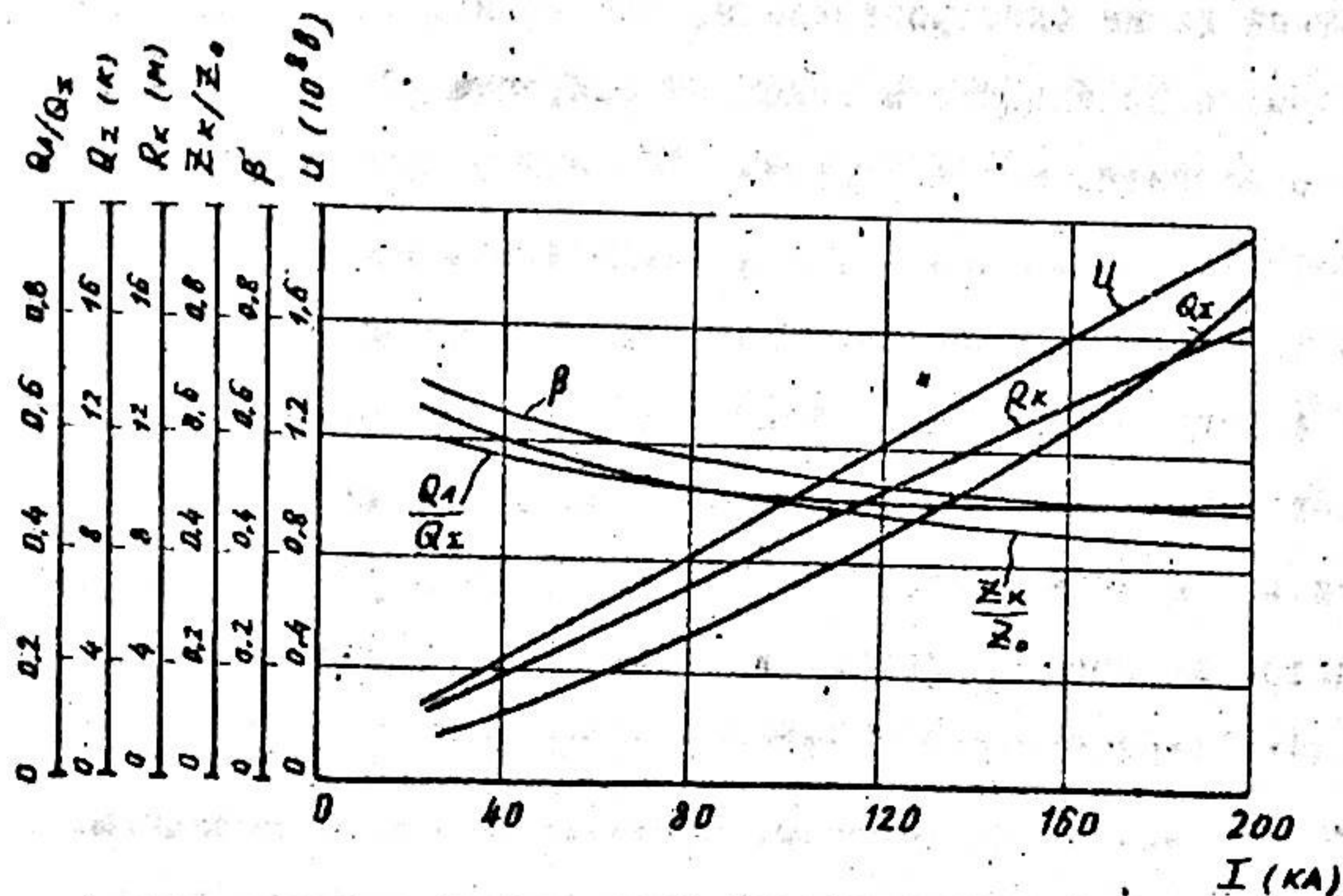
где Z_g - динамическое волновое сопротивление, после преобразований можно получить:

$$\frac{Z_k}{Z_0} = \frac{U}{\sqrt{\ln \frac{2H}{r_0} - 1} \cdot \int_0^U \frac{du}{\sqrt{\ln \frac{2H}{R_k} - 2}}}$$

Строго говоря, волновое сопротивление Z_0 вертикального провода зависит от его длины и для обратного разряда

молнии является возрастающей функцией времени. Так как при расчетах грозозащиты основной интерес представляют времена порядка 1 мксек и более, когда Z_0 изменяется медленно, для практических целей можно принять Z_0 постоянным и равным 700 - 800 ом. С учетом короны это дает для волнового сопротивления канала молнии величину порядка 400 - 500 ом. Наличие искривлений канала должно приводить к некоторому увеличению волнового сопротивления, так что окончательно можно считать его лежащим в пределах 500 - 600 ом.

Для проверки приемлемости предложенной расчетной модели в диссертации приводятся результаты расчетов для многих вариантов. При этом, определению принадлежали числовые характеристики тока молнии, а также некоторые соотношения, которые легко поддаются регистрации в полевых условиях (см. приводимый график)



Кроме интересующих нас значений β и $\frac{Z_k}{Z_0}$ на графике приведены вспомогательные кривые изменения радиуса коронного чехла R_k , величины суммарного заряда Q_x и соотношения заряда главного разряда к суммарному $\frac{Q_1}{Q_x}$. Диапазоны полученных значений этих величин находятся в соответствии с результатами измерений. Кроме того удалось качественно согласовать некоторые известные явления, не нашедшие удовлетворительного объяснения при других гипотезах.

Интересно отметить, что в этой расчетной модели канала молнии удалось соблюсти известное соотношение между током, волновым сопротивлением и потенциалом лидерного канала, если учесть особенность вольткулоновых характеристик импульсной короны при разных полярностях.

Таким образом, при применении методики расчета числа отключений линии электропередачи, основанной на теории запаздывающего потенциала и конечной скорости распространения главного разряда, можно принять $U = 0,3$ скорости света, т.к. расчет ведется для случая, когда канал молнии заменяется вертикально расположенным каналом. В этом случае в расчет входит кажущаяся скорость, а не истинная. Найденное значение волнового сопротивления также не привело к существенному изменению в методике расчета. Поэтому в четвертой главе, где приводится конкретный расчет для некоторых линий ДРВ при различных значениях сопротивления заземления опоры, в основу расчета берется метод расчета, предложенный Д.В.Разевигом. Для учета числа прорывов молнии мимо тросов используется

уточненная формула. Результаты расчетов показывают, что расчетные числа отключений линий электропередачи очень велики, особенно при плохом заземлении. Например, для линии ИЮхв на одностоечных опорах при сопротивлении заземления опор, равном 10, 30, 50 ом имеем соответственно числа отключений, равные 8,5; 27 и 45.

Эти значения в несколько раз превосходят суммарное число отключений линий в год. Такое расхождение, наверное, вызвано тем, что несмотря на большое число грозových часов во Вьетнаме, средняя удельная плотность поражений молнии на поверхность земли не намного отличается от плотности для районов средней полосы. Об этом говорят результаты первых по определению плотности поражений молнии на поверхность земли.

Общие выводы

1. По имеющимся в настоящее время данным температура лидерного канала имеет величину порядка 20000°K , благодаря чему удельное сопротивление лидерного канала достаточно мало, и распространение обратного разряда имеет волновой характер. Поэтому использование при расчетах грозозащиты таких понятий, как волновое сопротивление канала молнии и скорости распространения обратного разряда, является вполне оправданным.

2. Отличие измеренных значений скорости обратного разряда от скорости света определяется двумя основными причинами:

а) Наличием обратной короны с канала обратного разряда, которая возникает из-за влияния объемного заряда, созданного в лидерной стадии в окружающем канал пространстве. В работе показано, что под влиянием короны скорость обратного разряда снижается в среднем в 2 раза по сравнению со скоростью света.

б) Мелкими и крупными искривлениями канала молнии, обусловленными статистическим характером направлений развития отдельных лавин и стримеров.

В работе показано, что при принятии определенных допущений, можно теоретически подсчитать среднее значение коэффициента удлинения за счет искривлений, которое оказалось равным $\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \approx 2,5$.

Если учесть преимущественное направление развития стримеров вниз, что особенно заметно при приближении лидерного канала к земле, то средний коэффициент удлинения за счет искривлений будет несколько меньше 2. Совместный учет торможения обратного разряда под действием обратной короны и искривлений канала позволяет сделать заключение, что истинная скорость обратного разряда близка к половине скорости света, а измеряемая оптическими методами (кажущаяся) скорость может изменяться в широких пределах $(0,1 + 0,5) c$ с средним значением $(0,25 + 0,30) c$, что соответствует результатам непосредственных измерений.

3. Волновое сопротивление канала молнии, как и всякого вертикального провода, зависит от его длины. Однако при дли-

не канала обратного разряда более 100 м, т.е. при времени больше 1 мксек, волновое сопротивление изменяется незначительно и можно пользоваться его средним значением, которое получено с учетом уменьшения волнового сопротивления под действием обратной короны и некоторого увеличения из-за наличия искривления.

4. Применяемая в настоящее время схема расчета грозовых перенапряжений на линиях электропередачи является в основном правильной, так как замена искривленного канала прямолинейным с соответственно сниженной скоростью распространения обратного заряда не должна существенно повлиять на точность расчетов.

5. Существующее расхождение между расчетными и эксплуатационными числами отключений линий электропередачи в ДРВ объясняется, по-видимому, резким уменьшением плотности ударов на поверхность земли в районах с тропическим климатом. Поэтому основной задачей будущих исследований в области грозозащиты для ДРВ должна являться, помимо сбора статистических данных по параметрам тока молнии, организация метеорологических наблюдений, позволяющих найти связь между числом грозовых дней, продолжительностью гроз в часах и числом ударов молнии в землю.

По материалам диссертации были сделаны доклады на семинарах кафедры I/VI-70 и I5/XI-71 г. и написаны:

I. Разевиг Д.В., Буй Тхиен Зу "Параметры канала молнии" Тезисы доклада на заседании секции IV Научного Совета АН СССР

по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики. Баку, 1971 г.

2. Разевиг Д.В., Бун Тхиен Зу "Обратный разряд молнии" Электричество, (Принята к печати).