Затухание блуждающих волн очень высокого напряжения в 110-kV линии электропередачи

А. К. ПОТУЖНЫЙ и С. М. ФЕРТИК

Харьковский электротехнический институт

Изложены результаты экспериментального исследования затухания и деформации блуждающих волн очень высокого напряжения в 110 kV линии электропередачи. Проведенными опытами удалось существенно расширить диапазон изученных волн, доведя амплитуду волны импульса в линии электропередачи до 2,25 млн. V. Установлены некоторые новые факты относительно затухания волн с очень высокой амплитудой.

Исследования, которым посвящена эта статья, проводились кафедрой передачи электроэнергии Харьковского электротехнического института и явились продолжением и развитием более ранних работ кафедры, выполненных на линиях 35 и 20 kV [Л. 1, 2, 3].

На линии 110 kV было весьма подробно изучено поведение длинных и коротких полных волн импульсов, близких по форме к стандартным волнам 1/5 1/5/40 μsec, а также многочисленных срезанных волн различной амплитуды, длины и полярности. К сожалению, все материалы по затуханию и деформации срезанных волн в линии 110 kV погибли осенью 1941 г. при эвакуации Харькова. Случайно уцелели лишь данные по затуханию полных волн импульсов.

В опытах на 110-kV линии были получены искусственные блуждающие волны еще более высокого напряжения, чем те, какие авторам удалось получить ранее в линиях 35 и 20 kV. Так, амплитуда напряжения короткой положительной волны импульса типа $^1/_5$ μsec была доведена до 2,1 млн. V (в линии), а отрицательной волны импульса — до 2,25 млн. V, что более чем на 25% превысило соответствующие значения, полученные ранее, и оставило далеко позади величины, с которыми оперировали иностранные исследователи [1].

В рассматриваемой серии опытов была полностью использована максимальная энергия полевого генератора импульсов ХЭТИ [Л. 5]. Для дальнейшего повышения напряжения блуждающих волн и еще большего приближения их по амплитуде и длине к наиболее мощным волнам перенапряжений, создаваемым в линиях электропередачи естественными грозовыми разрядами, необходим генератор импульсов с еще более высоким разрядным напряжением [2].

Объект исследования и методика работ. Объектом исследования послужила одна из эксплоатируемых 110-kV линий электропередачи системы Донэнерго. Линия — 3-фазная, одноцепная, с горизонтальным расположением проводов, транспозиций не имеет. Длина участка, на котором происходили опыты, несколько более 17 km. Защитный трос на этом участке отсутствует. Опоры — деревянные, нормального типа. Расстояние между соседними фазами 4 m, расстояние от провода до земли на промежуточной П-образной опоре — 11,9 m, на анкерной А-П-образной опоре — 12,8 m. Расстояние от провода до земли в середине пролета около 7 m. Средняя длина пролета — 80 m.

Трасса линии расположена в мало пересеченной местности и только в двух местах проходит над оврагами. Почва вдоль линии — чернозем, под которым находится глина. Удельное сопротивление почвы составляло в среднем $0{,}7 \cdot 10^4$ Ω cm и колебалось в зависимости от погоды в пределах $0{,}5 \cdot 10^4 \div 0{,}8 \cdot 10^4$ Ω cm.

Блуждающие волны возбуждались в линии с помощью перевозного генератора импульсов ХЭТИ, имевшего номинальное напряжение в разряде 3 млн. V и емкость в разряде 0,0125 μF [Л. 5].

Регистрация волн импульсов производилась с помощью двухлучевого катодного осциллографа с внешней контактной съемкой конструкции ХЭТИ, монтированного в перевозной катодно-осциллографической станции.

Синхронизация генератора импульсов и катодного осциллографа при регистрации полных волн происходила по автоматической схеме, не требующей дополнительного зажигающего про-

---

[1] Как известно, наибольшая амплитуда искусственной блуждающей волны в линии передачи была получена в США Коньеллом и Фортескью [Л. 4] и составляла 940 kV.

[2] Сооружение такого сверхмощного генератора импульсов полевого типа с номинальным напряжением 8,4 млн. V и емкостью в разряде 0,013 μF было закончено ХЭТИ летом 1941 г. [Л. 6]. Эта уникальная установка была разрушена немецкими захватчиками.

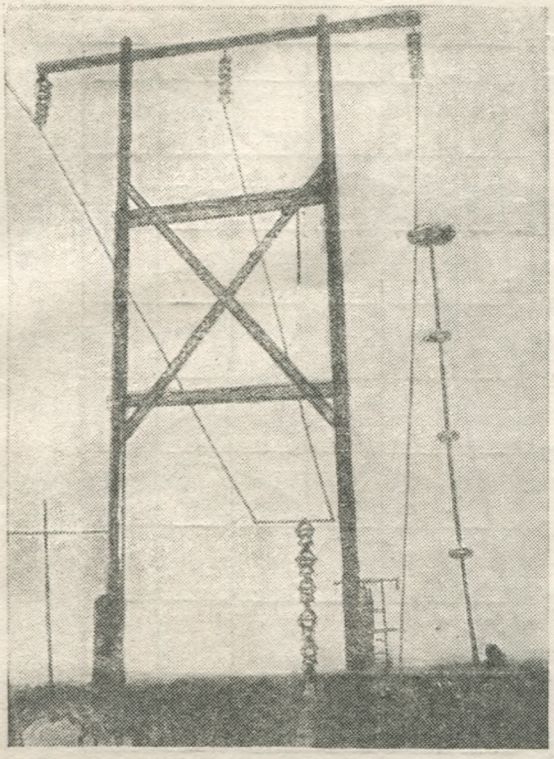

Рис. 1. Экранированный делитель напряжения на 110-kV линии передачи.

вода между генератором импульсов и катодным осциллографом. Волны импульса, проходя мимо катодного осциллографа, инициировали через антенну или зажигающий емкостный делитель напряжения схему питания разрядной трубки и временного разворота.

Между катодным осциллографом и измерительным делителем напряжения включался отрезок кабеля такой длины, чтобы время пробега волны по кабелю было больше, чем собственное время срабатывания схемы.

Деление напряжения производилось с помощью экранированного омически-кабельного делителя (рис. 1). Экраны имели форму, близкую к эллипсоиду вращения, и были изготовлены из алюминия. Элементы сопротивления были выполнены из манганиновой проволоки, навитой на каркасы особой формы, обеспечивающей их малую индуктивность.

Делитель подвешивался непосредственно к проводам исследуемой линии передачи. Работа делителя такой конструкции в полевых условиях (отсутствие искажающего влияния стен здания, делитель расположен в электрическом поле линии), безусловно, обеспечивала неискаженную регистрацию полных волн при напряжениях до 3 000 kV [Л. 7].

Генератор импульсов был установлен у опоры, которую мы условно обозначим № 1, а перевозная катодно-осциллографическая станция последовательно устанавливалась у опор № 2, 10,47 и 108 на расстоянии соответственно 0,11; 1,10; 5,05 и 12,00 km от генератора импульсов. Каждый опыт повторялся пять раз.

Испытания происходили во второй половине лета и осенью и были закончены 20 октября.

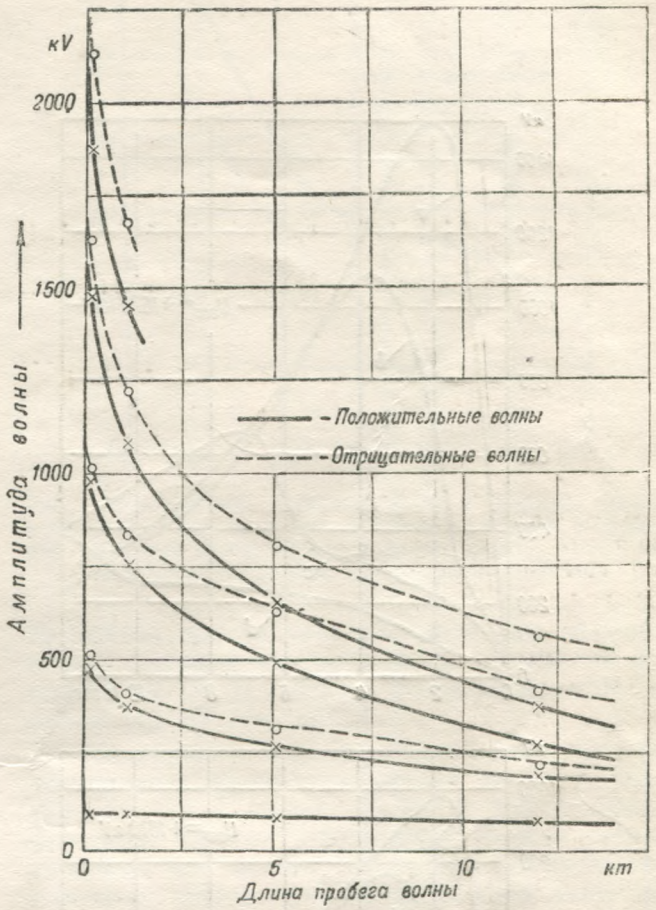

Рис. 2. Затухание волн типа 1/5 μsec, распространяющихся вдоль одного провода 110-kV линии передачи (амплитуда волны в зависимости от длины пробега).

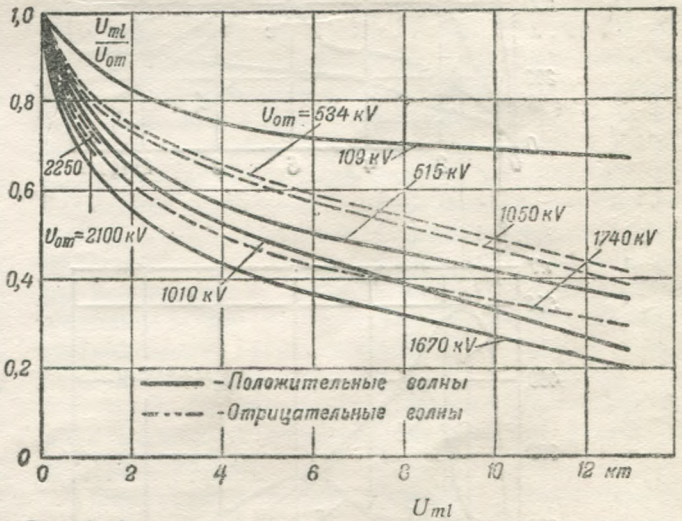

Рис. 3. Относительное затухание $\frac{U_{ml}}{U_{om}}$ волн типа 1/5 μsec в 110-kV линии передачи в зависимости от длины пробега.

Затухание коротких волн типа $^1/_5$ μsec. Результаты опытов по затуханию коротких волн типа $^1/_5$ μsec в линии 110 kV представлены в виде кривых затухания на рис. 2 и 3, а на рис. 4 и 5 приведены усредненные осциллограммы соответствующих волн. Картина, полученная на линии 110 kV, оказалась во многих отношениях сходной с той, какая была получена авторами ранее на линии 35 kV.

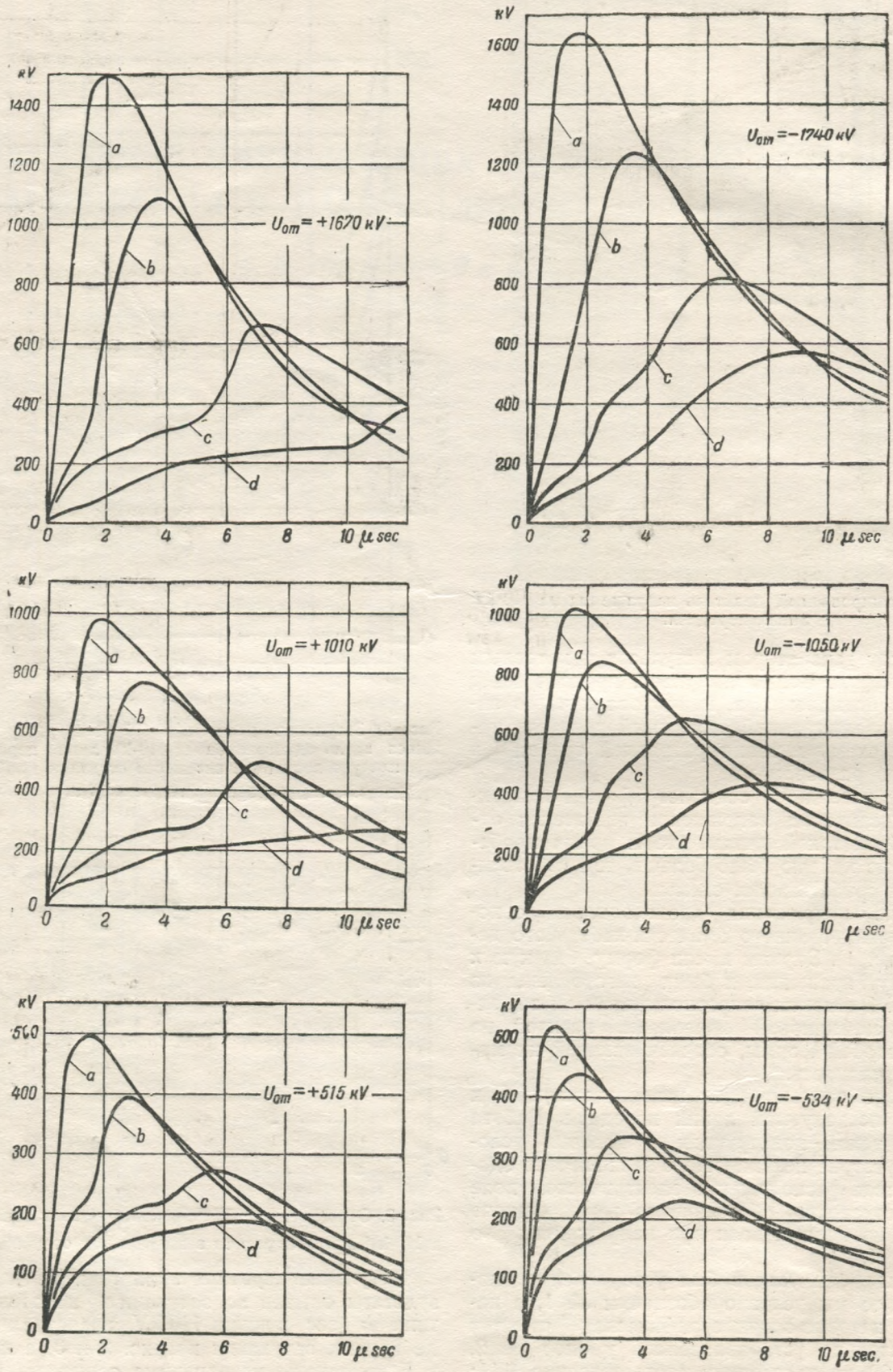

Рис. 4. Деформация блуждающих волн типа 1/5 μsec, распространяющихся вдоль одного провода 110-kV линии передачи. Напряжение исходной волны выше коронного. Длина пробега волны; *a*—0,11 km; *b*—1,11 km, *c*—5,05 km и *d*—12,0 km.

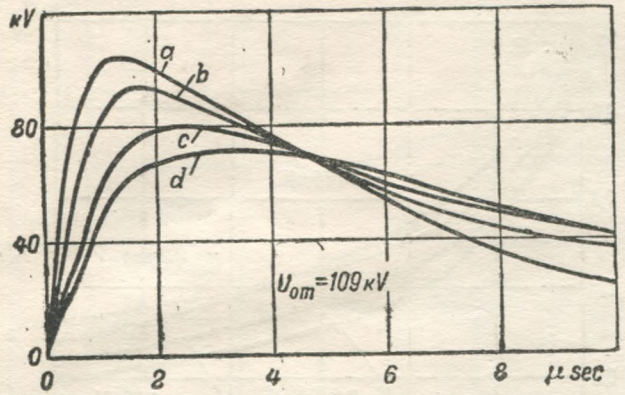

Рис. 5. То же, что и рис. 4, напряжение исходной волны ниже коронного.

Положительные волны затухали быстрее отрицательных. У волн очень высокого напряжения затухание в основном определялось потерями энергии на корону. Так, волна с исходной амплитудой 108 kV (напряжение ниже критического напряжения короны) теряла на пути 1,1 km всего 12,9% напряжения, тогда как положительная волна с исходной амплитудой 515 kV теряла на том же пути уже 23,5% напряжения. С возрастанием напряжения относительное затухание возрасталю и при амплитуде исходной волны 1 670 kV (+) достигло 34,5%, т. е. было почти в 3 раза больше, чем при напряжении ниже коронного.

Весьма неожиданный результат дало дальнейшее повышение амплитуды волны импульса в линии до напряжений свыше 2 000 kV, при которых не наблюдалось дальнейшего увеличения относительного затухания. Так, при положительной волне с исходной амплитудой $U_{om} = 2\,100$ kV относительная потеря напряжения на пути в 1,1 km составляла 30,4%, т. е. оказалась даже несколько меньше, чем у положительной волны с исходной амплитудой 1 670 kV (34,5%). У волн отрицательной полярности относительная потеря напряжения с повышением амплитуды напряжения исходной волны также несколько уменьшилась (25,4% при $U_{om} = -2\,250$ kV против 29,0% при $U_{om} = -1\,740$ kV). Этому новому явлению, которое до сих пор, насколько известно, никем не наблюдалось и которое было бы весьма интересно исследовать и на других линиях передачи и при более высоких напряжениях, можно дать следующее объяснение:

1. При амплитуде напряжения волны около 1 500 kV «геометрический фактор» (разложение на многоскоростные составляющие) сказывался на уменьшении амплитуд сильнее, чем при более высоком напряжении свыше 2 000 kV.

2. Потери на корону, являющиеся при очень высоком напряжении основным фактором, определяющим затухание волны, не следуют квадратичному или кубическому закону (лежащему в основе соответственно формулы Скиллинга и Дайкса [Л. 8] и формулы Фауста и Менджера [Л. 9]). Об этом говорит также уменьшение коэффициента затухания в формуле Фауста и

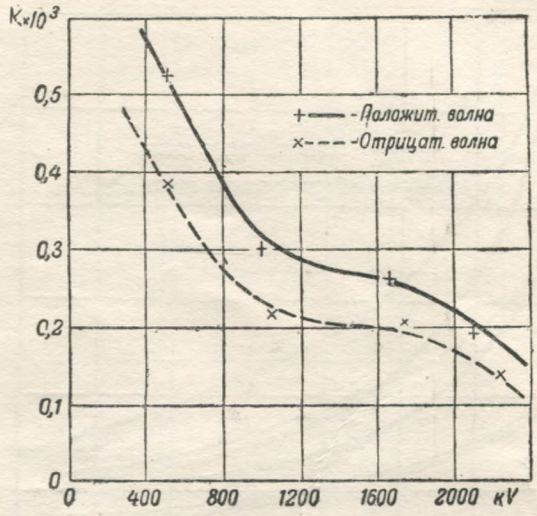

Рис. 6. Коэффициент затухания $K \cdot 10^3$ в формуле Фауста и Менджера для волн типа 1/5 μsec в функции напряжения исходной волны. Волна в одном проводе 110-kV линии передачи (длина пробега волны 1,10 km).

Менджера при увеличении амплитуды исходной волны, которое мы наблюдали раньше на линии 35 kV [Л. 1] и теперь снова обнаружили на линии 115 kV (см. ниже).

Обращаясь к вопросу о совпадении экспериментальных кривых затухания коротких волн типа 1/5 μsec в линии 110 kV с общеизвестной формулой Фауста и Менджера, можно констатировать, что может быть получено удовлетворительное апроксимирование, однако лишь при том условии, что каждой форме, амплитуде и полярности волны будет приписано свое особое значение коэффициента затухания. Таким образом подтвердились соотношения, полученные авторами ранее на линии 35 kV. На рис. 6 показана зависимость коэффициента затухания от амплитуды исходной волны (длина пути пробега 1,10 km). Мы снова убеждаемся [Л. 1], что даже при неизменной форме и полярности волны коэффициент затухания все же не остается постоянным и убывает с возрастанием амплитуды волны. Это, опять-таки, подтверждает наше предположение, что потери на импульсную корону возрастают в зависимости от напряжения медленнее, чем по кубическому закону. В свете приведенных экспериментальных данных представляются недостаточно обоснованными попытки [Л. 12] установить зависимость коэффициента затухания от длины волны, без учета амплитуды волны.

Переходя к количественным соотношениям, следует указать, что затухание волн в линии 110 kV происходило несколько медленнее, чем в линии 35 kV. Впрочем, различия были невелики, и для практических расчетов они вряд ли могут иметь существенное значение. Например, положительная волна с амплитудой 1 500 kV в линии 110 kV на пути 5 km теряла около 60% первоначального напряжения, а в линии 35 kV на том же пути теряла около 70% напряжения. Для отрицательной волны с примерно такой же начальной амплитудой напряжения получилось

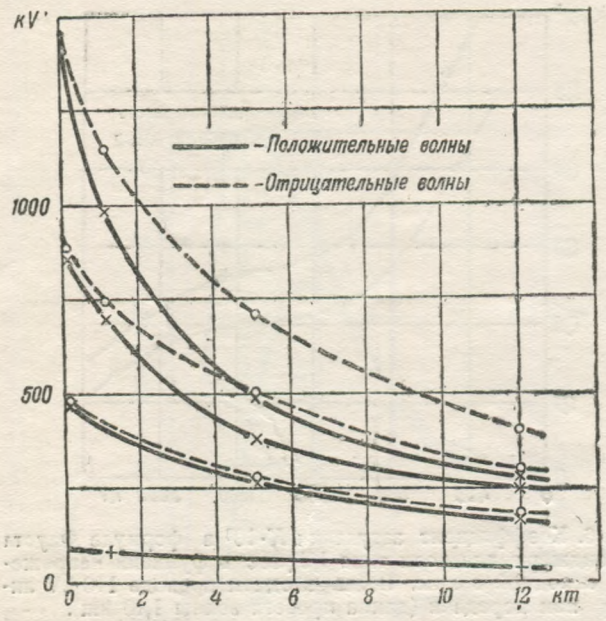

Рис. 7. Затухание волн типа 1/5 μsec, распространяющихся одновременно в трех проводах 110-kV линии передачи (амплитуда волны в зависимости от длины пробега).

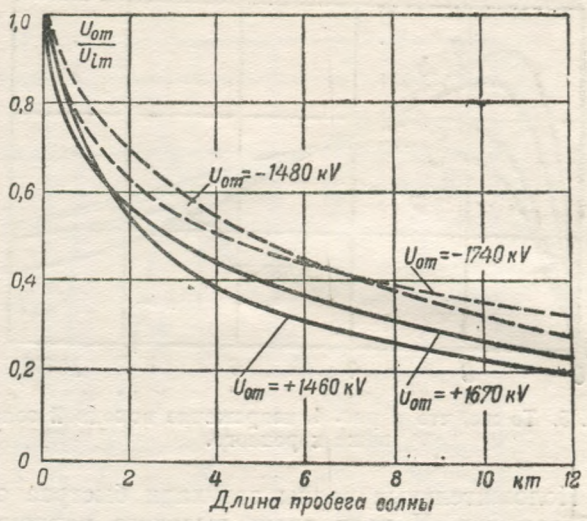

Рис. 8. Сопоставление относительного затухания $\frac{U_{om}}{U_{lm}}$ волн типа 1/5 μsec, распространяющихся вдоль одного провода (кривые для U_{om}, равного +1 670 и —1 740 kV) и вдоль трех проводов 110-kV линии передачи.

соответственно 54 и 63%. Волна с напряжением ниже коронного на пути 5 km в линии 115 kV теряла 26%, а в линии 35 kV — 28% напряжения. Как видим, относительное затухание изменялось при переходе от линии 35 kV к линии 110 kV в очень узких пределах, почти не выходящих за пределы точности измерений. Колебания в величине коэффициента затухания на обеих линиях, само собой разумеется, также оказались невелики.

Деформация волн в линии 110 kV близко напоминала деформацию аналогичных волн в линии 35 kV. На фронте волны, как правило, получался более или менее четко выраженный уступ, причем в некоторых случаях было отчетливо видно образование трех составляющих с различными скоростями распространения. В отличие от опытов на линии 35 kV, на линии 110 kV при напряжении ниже коронного на фронте волны явственно было заметно образование составляющих, распространяющихся с различной скоростью (рис. 5).

Здесь не приводятся кривые увеличения фронта и длины блуждающих волн, которые мало отличаются от кривых, полученных ранее на линии 35 kV [Л. 7]).

Затухание длинных волн типа 1,5/40 μsec. Длинные волны, как и следовало ожидать, затухали медленнее коротких, однако различие получилось не таким большим, как при измерениях авторов на линии 35 kV. Так, коэффициент затухания в формуле Фауста и Менджера при волне 1,5/40 μsec и U_{om} =480 kV был равен $0{,}27 \cdot 10^{-3}$ (на пути 1,1 km) и $0{,}13 \cdot 10^{-3}$ (на пути 0,05 km). Интересно отметить, что коэффициент затухания волны 1,5/40 μsec, 480 kV, определенный на участке между опорами № 10 и № 47 (1,1 и 5,05 km), составлял всего $0{,}08 \cdot 10^{-3}$.

Для волн типа 1,5/40 μsec очень невелики оказались различия между волнами положительной и отрицательной полярности. Это может быть объяснено тем, что затухание длинных волн не очень высокого напряжения под влиянием потерь на корону относительно невелико; большее значение имеет «геометрический» фактор (разложение волны на составляющие с различными скоростями распространения). Последнее обстоятельство, повидимому, сказалось и на том факте, что затухание длинных волн в линии 110 kV было значительно больше, чем в линии 35 kV, где, как выше уже упоминалось, не наблюдалось разложения волны на многоскоростные составляющие при напряжении ниже коренного.

Деформация длинных волн в основном подобна деформации коротких волн типа 1/5 μsec такого же напряжения, поэтому соответствующие диаграммы здесь не приводятся.

Волны, распространяющиеся одновременно по трем проводам. Кривые затухания волн, распространяющихся одновременно в трех проводах линии 110 kV, представлены на рис. 7. На рис. 8 произведено сопоставление кривых относительного затухания блуждающих волн, распространяющихся в одном проводе и в трех проводах. Как видим, волны, распространяющиеся одновременно по трем проводам, затухают быстрее (или, во всяком случае, не медленнее), чем волны, распространяющиеся в одном проводе. Это явление, которое наблюдалось авторами и ранее в линии 35 kV, зависит, повидимому, от того, что коронирование трех проводов вызывало одновременно относительно бо́льшую потерю напряжения волны, несмотря на относительно меньший радиус короны на каждом проводе, нежели потери при большей короне, но только в одном проводе. При этом увеличение потерь на корону компенсировало с избытком усиленное

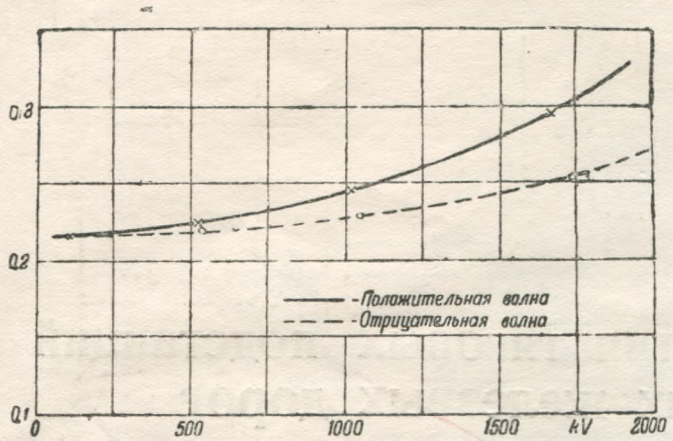

Рис. 9. Коэффициент связи в месте возникновения волны как функция напряжения индуктирующей волны.

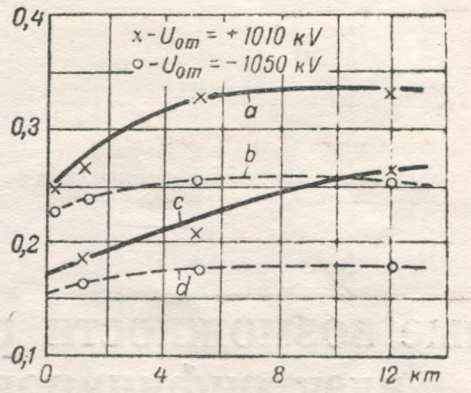

Рис. 10. Коэффициент связи в зависимости от длины пути пробега волны. *a*, *b*—смежные; *c*, *d*—крайние фазы. $U_{om} = -1\,740$ и $U_{om} = +1\,670$ kV.

затухание волны в одном проводе по сравнению с волной в трех проводах, вызванное разделением на многоскоростные составляющие.

Коэффициент связи и индуктированные волны. Результаты измерений коэффициента связи, произведенные в линии 110 kV при волне типа 1/5 μsec., представлены на рис. 9. С увеличением напряжения коэффициент связи возрастал, причем сильнее у волн положительной полярности, чем у волн отрицательной полярности.

Коэффициент связи при распространении блуждающей волны вдоль линии передачи (рис. 10) на первой части пути при длине пробега от 5 до 12 km оставался практически без изменения или даже несколько убывал и, во всяком случае, не превосходил 40%. Этот факт, повторявшийся при различных значениях амплитуды исходной волны, находится в противоречии с общепринятыми представлениями по этому вопросу, согласно которым коэффициент связи при распространении волны все время возрастает, пока в пределе основная и индуктированная волны не становятся равными.

Измерения коэффициента связи позволили определить расчетные значения радиуса импульсной короны, а также найти значения коронного градиента для положительных и отрицательных волн импульсов.

Если при этих подсчетах учитывать, что в коронирующем слое воздуха около провода в радиальном направлении происходит падение напряжения с градиентом, равным градиенту импульсной короны, то получается достаточно удовлетворительное совпадение приведенных выше экспериментальных данных с величинами, принимаемыми при обычных технических расчетах.

Не останавливаясь здесь подробнее на вопросах деформации блуждающих волн и, в частности, индуктированных волн, следует отметить, что удалось наблюдать волны весьма своеобразной формы. Волны, индуктированные в среднем проводе, после некоторого пробега вдоль линии совершенно отличались по форме от волн, индуктированных в крайнем проводе. Как будет показано в другом сообщении, эти интересные явления могут быть качественно объяснены с помощью многоскоростной теории распространения волн в трехфазной нетранспонированной линии.

Выводы: 1. Было проведено экспериментальное исследование затухания и деформации блуждающих волн в 110 kV линии передачи при напряжении волны импульса в линии до 2,25 млн. kV.

2. Коэффициенты затухания в 110 kV линии оказались того же порядка (на 6—17% ниже), что и для соответствующих волн в линии 35 kV.

3. Относительное затухание волн с повышением амплитуды исходной волны при напряжениях до 1,5 ÷ 1,7 млн. V возрастает. Однако, при более высоких напряжениях, свыше 2 млн. V, относительное затухание начинает убывать.

4. Коэффициент затухания в линии 110 kV с повышением амплитуды волны убывает.

5. Волны, распространяющиеся одновременно по трем проводам, при прочих равных условиях затухают не медленнее, чем волны, распространяющиеся по одному проводу.

6. Коэффициент связи при распространении волны в линии сперва несколько возрастает (на пути до 5 km), а затем остается практически неизменным.

Литература

1. А. К. Потужный, С. М. Фертик. Электричество, стр. 29, № 1, 1938.
2. S. Fertik, A. Potoujny. Conf. Intern. GRE, 1937.
3. А. К. Потужный, С. М. Фертик. „Электрические станции," стр. 22—29, № 4-5, 1939.
4. R. M. Conwell, C. L. Fortescue, AIEE Tr., v. 49, p. 872, 1939
5. А. К. Потужный С. М. Фертик. Электричество, стр. 27—33, № 20, 1936.
6. Электричество, стр. 50, № 1, 1941.
7. С. М. Фертик. Диссертация, ХЭТИ, 1939.
8. H. H. Skilling. El. Eng, p. 850—857, 1937.
9. Л. В. Бьюлей. Блуждающие волны в линиях передачи. Изд. 1938.
10. Jordan, GER, № 4, 1934.
11. С. И. Бровер, С. М. Фертик. Технический отчет ХЭТИ, 1938.
12. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений. III. Изд. Госэнергоиздата, 1946.