

если кривая равнопрочных расстояний — эллипс,

$$P = \frac{k_s}{k_0} = \sqrt{\frac{2\frac{H}{h} - \frac{h_0}{h} - 1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\left(2\frac{H}{h} - 1\right)}}. \quad (16)$$

Литература

1. Вальтер, Zeitschr. für Techn. Physik № 3, 1933.
2. Калинин Е. В., К вопросу о вероятности попадания прямого удара молнии и о защите от него. ЭНИА, доклад № 5, 1934.
3. Залесский А. М. и Долотов Н. И., Защита подстанций диверторами. "Электрические станции" № 2, 1934.
4. Залесский А. М. и Тоде Ж. В., О защите линий передач диверторами. "Электрические станции" № 2, 1936.

5. Пик Ф., Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. ОНТИ, 1934, стр. 264—270.
6. Его же, Lightning. Journ. of the Frankl. Inst. № 2, 1925.
7. Его же, Lightning and high voltage phenomena, брошюра фирмы GEC.
8. Его же, Lightning. Trans. AIEE, 1926, стр. 1131—1142.
9. Его же, Protection of oil Tanks and Reservoirs against Lightning. GER № 2, 1927.
10. Его же, Protection from Lightning I. El. World № 8, 1927.
11. Его же, Protection from Lightning II. El. World № 9, 1927.
12. Его же, Доклад на 2-й Мировой конференции по силовым установкам в 1930 г.
13. Акопьян А. А., Защитное действие одиночного стержневого молниеотвода. "Электричество" № 24, 1937.
14. Акопьян А. А., Исследование защитного действия молниеотводов на моделях. "Электричество" № 9—10, 1937.

Затухание волн высокого напряжения в 35-kV линии¹

А. К. Потужный и С. М. Фертик

Харьковский электротехнический институт

СУЩЕСТВУЮЩИЕ теории затухания и деформации блуждающих волн при напряжении выше коронного, как, например, многоскоростная теория Бьюли [7, 8, 9], имеют условный характер, основываются на ряде произвольных допущений и не могут быть использованы для количественной оценки явления. Для практических расчетов обычно применяется известная формула Фауста и Менджера (4), которая хотя и может быть обоснована теоретически с помощью некоторых весьма общих соображений, обладает только одним неоспоримым достоинством — большой простотой. К сожалению, как показала между прочим и настоящая работа, о применимости этой формулы можно говорить лишь с большой натяжкой, так как входящий в ее состав экспериментальный коэффициент зависит не только от параметров линии электропередачи, формы и полярности волны, но также и от амплитуды исходной волны.

Попытки улучшить формулу Фауста и Менджера за счет некоторого ее усложнения существенного успеха не имели, и на практике усложненная формула редко применяется, так как все же не удалось с помощью одной формулы удовлетворительно охватить затухание волн с различной начальной амплитудой.

Такое довольно безотрадное положение, в котором находятся наши знания по этому весьма интересному вопросу, объясняется, с одной стороны, большими математическими трудностями, возникающими при анализе явления распространения блуждающих волн в сложной неоднородной и нелинейной системе при напряжении выше коронного, а с другой — недостаточными и нередко противоречивыми экспериментальными данными.

Проводившиеся до сего времени немногочисленные исследования затухания блуждающих волн

с помощью генератора импульсов в реальных линиях электропередач (преимущественно в США) ограничивались волнами длиной от 3 до 20 мкс, при максимальном напряжении наиболее коротких волн до 800—900 кВ. Надежные данные по затуханию срезанных волн со срезом на фронте отсутствуют. На союзных линиях электропередач промышленного значения опытов по исследованию затухания блуждающих волн, насколько нам известно, не производилось².

Настоящая работа, проведенная на линии передачи 35 кВ Донэнерго, представляла собой попытку начать систематическое собирание фактического экспериментального материала по затуханию блуждающих волн на союзных линиях, необходимого как для решения практических задач защиты высоковольтных сетей от грозových перенапряжений, так и для углубленной теоретической разработки вопроса. При этом предполагалось наряду с возможным повышением напряжения исходной волны расширить диапазон изученных форм волн.

Линия передачи Киселево — Снежная. 35-kV линия передачи Киселево — Снежная, на которой были произведены осенью и зимой 1935 г. опыты по затуханию, имеет длину 7,71 км и входит в сеть 35 кВ Криндачево-Чистяковского района Донэнерго. Опыты по затуханию производились на участке линии без троса, имеющем длину 5,52 км. Сечение медного провода линии передачи — 50 мм². Опоры деревянные; изоляция — два и три элемента П-4,5. Основные электрические габариты опор представлены на рис. 1. Средняя длина пролета около 77 м.

Почва вдоль линии передачи состоит из сравнительно тонкого слоя чернозема (от 35 до

¹ Работа проведена по заданию Донэнерго. В полевых исследованиях, кроме авторов статьи, принимали участие техник Н. Г. Чалый, монтер П. И. Татаренко и студенты ХЭТИ А. А. Крупицкий и Г. М. Сапунов.

² На опытной линии ВЭИ длиной в 1 км были произведены в конце 1935 г. опыты [2] по затуханию очень коротких волн (длина волны $t_2 = 0,7 \div 1,2$ мкс) при напряжении до 660 кВ. Исследования по затуханию волн производились также на опытной линии ЛИИ [4] при напряжении до 400 кВ.

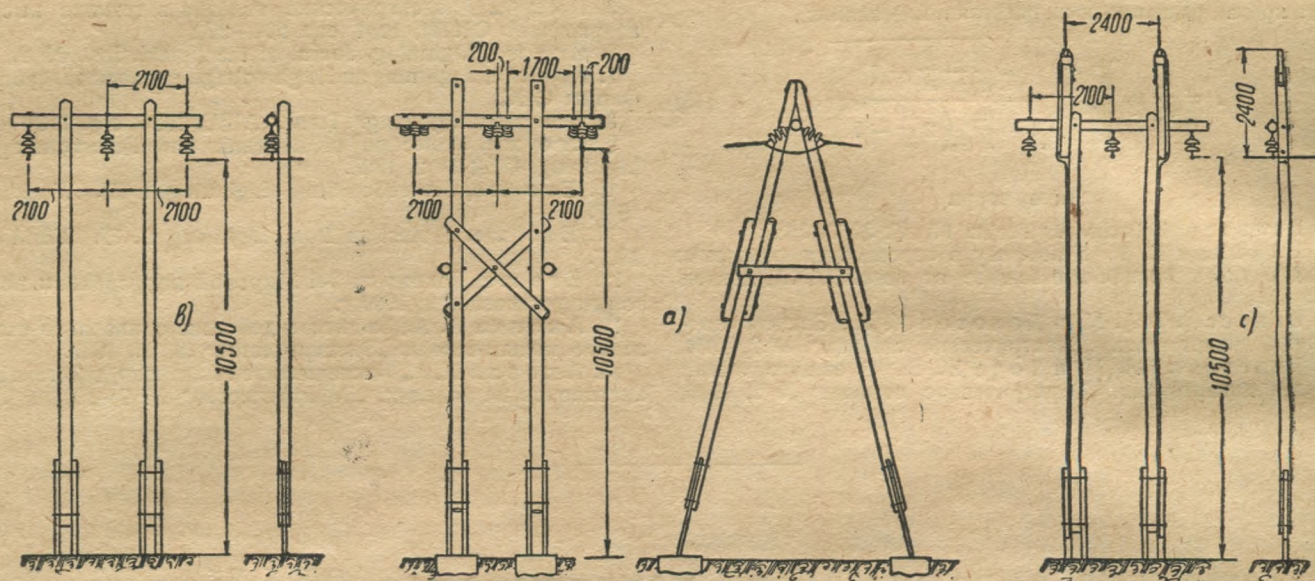


Рис. 1. Опоры 35-kV линии передачи Киселево — Снежная.
а — анкерная опора без троса, б и в — промежуточные без и при наличии троса

70 см), под которым находится сланец. Трасса линии расположена в слабо пересеченной местности, только в одном месте проходя над неглубоким оврагом.

Удельное объемное сопротивление почвы, измеренное прибором Сименса, колебалось в пределах от $0,3 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ в зависимости от места, погоды и времени года.

Сопротивление растеканию рельсовых оснований деревянных опор колебалось в пределах от 10 до 200 Ω .

Аппаратура и методика. Блуждающие волны посылались в линию с помощью полевого генератора импульсов ХЭТИ 3000 kV с емкостью в разряде $0,0125 \mu\text{F}$ [5].

Измерение импульсов производилось с помощью передвижной катодно-осциллографической станции, оборудованной катодным осциллографом с внешней съемкой по контактному методу. Катодно-осциллографическая станция перевозилась на тракторе, который использовался также для вращения синхронного генератора, питающего установку электрической энергией³.

Схема синхронизации генератора и катодного осциллографа представлена на рис. 2. Для посылки зажигающего импульса от вспомогательного генератора импульсов к катодному осциллографу использовался один из проводов линии передачи.

Схема эта очень проста и работает вполне надежно и четко, ее недостатком является то, что при волнах невысокого напряжения, и в особенности при измерениях индуктированных волн, зажигающий импульс вносит известные искажения, которые впрочем легко могут быть учтены. Съемка волны, движущейся по трем проводам, при этой схеме требует отдельного зажигающего провода.

Для деления напряжения применялся омический кабельный делитель, который подвешивался непосредственно к проводам линии передачи (рис. 3).

Сопротивление было изготовлено из манганина $d = 0,07 \text{ mm}$, намотанного по типу гребенки на лакированный картон.

Делитель напряжения, включенный в линию, был проградуирован при волнах $(+)$ $1/5 \mu\text{sec}$ и $(+)$ $1,5/40 \mu\text{sec}$ с помощью стандартного стержневого промежутка, и в диапазоне от 100 до 1700 kV коэффициент деления практически совпадал с расчетной величиной. Отклонение отдельных осциллограмм от среднего значения не превышало $\pm 5\%$.

Катодный осциллограф передвигался вдоль линии передачи и устанавливался последовательно на расстоянии 0,1; 0,65; 1,13; 2,14 и 5,52 km до генератора импульсов.

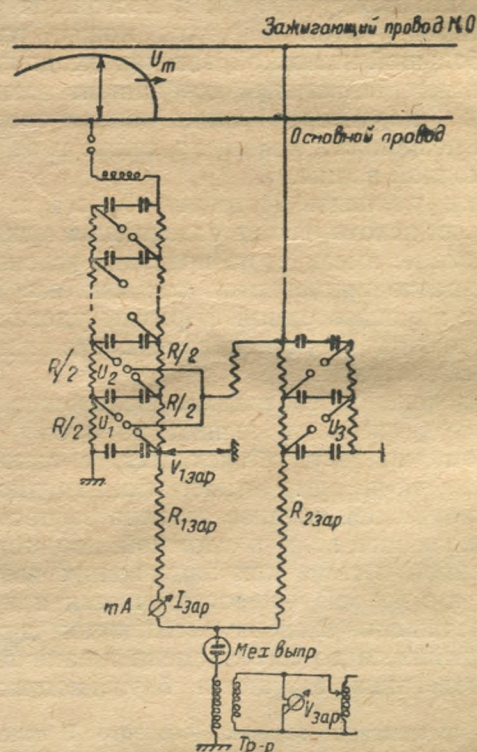


Рис. 2. Схема работы генератора импульсов в опытах 1935 г.

³ Постройкой передвижной катодно-осциллографической установки руководил доц. Г. Г. Демидов, производивший также наладку ее работы в поле.



Рис. 3. Момент монтажа омического кабельного делителя на опоре линии передачи

Стержневой промежуток, применявшийся для получения срезанных волн, устанавливался непосредственно у самого генератора импульсов.

Опыты по затуханию производились осенью и в начале зимы в период от 18 октября по 6 декабря 1935 г. как в сухую, так и в сырую погоду. Во время дождя, гололеда и тумана испытания прекращались. Атмосферные условия колебались во время опытов в довольно широких пределах. Температура воздуха изменялась от $+20$ до -10° , составляя в среднем около 12° , барометрическое давление — от 732 до 756 мм рт. ст., составляя в среднем около 745 мм, абсолютная влажность — от 7 до 17 мг/м³.

Каждая волна перенапряжения данной амплитуды, формы и полярности многократно регистрировалась катодным осциллографом, причем для полных волн снималось в данной точке не менее 5 осциллограмм, а для срезанных волн — соответственно не менее 10 осциллограмм.

Явления, сопутствовавшие распространению вдоль линии волны очень высокого напряжения. Отметим здесь те любопытные явления, которые сопутствуют распространению вдоль линии передачи электромагнитной волны очень высокого напряжения (1000—1700 кВ) и которые особенно отчетливо и наглядно проявляются ночью.

С повышением напряжения импульса существенно усиливается специфический звуковой эффект импульсной короны в линии, несколько напоминающий звук разрывания полотна, но гораздо более сильный и резкий, по силе приближающийся к выстрелу из винтовки. Благодаря запаздыванию звука наблюдатель воспринимает его в виде непродолжительного раската, длящегося менее секунды.

Оптический эффект короны создает впечатление довольно яркой вспышки, которая уже при 1000 кВ отчетливо видна ночью вдоль всей линии передачи. В данном случае получилось полное подтверждение показаний очевидцев прямых ударов молнии, утверждающих, что провода линии «вспыхнули» или «загорелись».

С повышением напряжения импульса на отдельных опорах в местах крепления провода замечается сперва усиленное коронирование, затем более или менее яркий неполный разряд по изолятору. При сырых опорах, но не во время дождя

и очень высоком напряжении частичный разряд в некоторых местах охватывает полностью всю гирлянду, поддерживающую провод, по которому распространялся основной импульс, однако перекрытия дерева между фазами еще не наступает. Интересно отметить, что такие весьма яркие стримеры наблюдались в отчетливой форме лишь на некоторых отдельных опорах линии передачи с особенно загрязненными или несколько дефектными изоляторами, причем опоры эти вовсе не являлись ближайшими к генератору импульсов. Повидимому, в первый момент влажная траверза имеет потенциал земли, что и объясняет наблюдаемое явление.

При напряжении около 1800 кВ на опоре, ближайшей к генератору импульсов, наблюдалось перекрытие между фазами, сопровождавшееся расщеплением траверзы. Опора эта анкерная с двойными подвесками из трех изоляторов П-4,5 (рис. 1), в которой расстояние по дереву между штырями подвесок смежных фаз, как мы выше уже упоминали, составляет всего 1700 мм при расстоянии по воздуху 2100 мм. Траверза не гнилая, дерево было сырое, но не мокрое. Расщепление — поверхностное, распространившееся на глубину 5—10 мм при ширине 20—40 мм. Импульс распространялся по крайней фазе, перекрытие происходило одновременно на среднюю и другую крайнюю фазу.

Учитывая коэффициент связи и принимая в порядке первого приближения, что импульсная прочность дерева и фарфора арифметически суммируется, находим, что траверза опоры перекрывалась при импульсном напряжении 180 кВ между смежными и 450 кВ между крайними фазами, что соответствует перекрывающим градиентам от 105 до 120 кВ/м. Полученные величины значительно ниже обычно рекомендуемых (по ГЭС—330 кВ/м).

Из сказанного выше о неполных разрядах следует, что мы имеем здесь дело с последовательным перекрытием сперва фарфора, а затем дерева, благодаря чему суммарное разрядное напряжение фарфора и дерева не сильно отличается от разрядного напряжения одной только фарфоровой изоляции. Аналогичные указания имеются у Мельвина.

Особого внимания заслуживает факт одновременного перекрытия с одной крайней фазы на обе другие фазы. Данный эксперимент ясно показывает, что в условиях эксплуатации трехфазное к. з. было бы здесь не менее вероятно, нежели двухфазное даже при ударе молнии в крайний провод. Напротив, вероятность однофазного замыкания на землю здесь, повидимому, очень мала.

Выбор формы волн. Производившиеся до сего времени опыты по затуханию исходили из волн случайной формы, зависящей от емкости в разряде генераторов импульсов. Во многих случаях в публикациях вообще отсутствуют достаточные указания на форму волны. В то же время совершенно очевидна сильнейшая зависимость интересующего нас явления от формы волны. Поэтому для получения сравнимых результатов удобнее во всех опытах исходить из волн определенной формы.

В качестве основных волн нами были выбраны так называемые стандартные волны: $\pm 1/\delta$ и

$\pm 1,5/40 \mu \text{sec}$. Первая из этих волн получается при непосредственном разряде генератора импульсов ХЭТИ в линию передачи, а вторая требует параллельно-последовательного соединения конденсаторов в момент разряда [5].

Для исследования затухания коротких волн, получающихся на линии передачи в естественных условиях, вследствие среза на линейной изоляции можно применить либо очень короткие полные волны либо срезанные волны.

Наиболее естественным и практически, пожалуй, единственно приемлемым способом получения в линии коротких волн с значительной скоростью нарастания напряжения является срез полной волны с помощью искрового промежутка той или другой формы, установленного у генератора импульсов.

Для срезывания волны был применен стержневой промежуток, по конструкции приближающийся к стандартному. Стержни — железные, квадратного сечения $16 \times 16 \text{ mm}$.

В опытах 1935 г. длины искровых срезающих промежутков были выбраны 250 и 750 mm в соответствии с примерными эквивалентами изоляции 35 и 115 kV при малых временах запаздывания.

Наибольшее напряжение волны $(-)$ $1/5 \mu \text{sec}$, полученное в линии Киселево—Снежная, составляло 1760 kV, что соответствовало около 2400 kV номинальных на генераторе импульсов. Дальнейшее повышение напряжения оказалось невозможным, так как при этом наступало перекрытие линейной изоляции.

Напряжение в линии длинной волны $(-)$ $1,5/40 \mu \text{sec}$ было доведено до 500 kV (около 800 kV номинальных на генераторе импульсов).

На рис. 4 приведены наибольшие по напряжению положительные волны, полученные в линии Киселево—Снежная, а также для сравнения искусственные волны, полученные различными исследователями в американских линиях передачи.

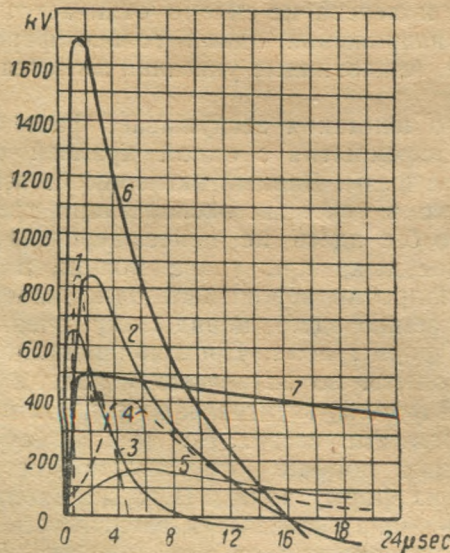


Рис. 4. Блуждающие волны, полученные в линиях передачи при различных исследованиях.

1 — Fortescue и Fielder, 2, 3 — Brune и Eaton, 4 — Mc. Eachron, Wade, 5 — Southgate, Brookes, Whithead, Roman, 6 и 7 — ХЭТИ, 1935

Затухание и деформация полных волн. Результаты измерения затухания волн типа $1/5 \mu \text{sec}$ представлены в виде кривых затухания и реконструированных (усредненных) осциллограмм на рис. 5, 6, 7. В качестве иллюстрации на рис. 8 приведено несколько образцов соответствующих осциллограмм.

Рассмотрение кривых рис. 5—7 приводит к следующим выводам. Затухание амплитуд, как это

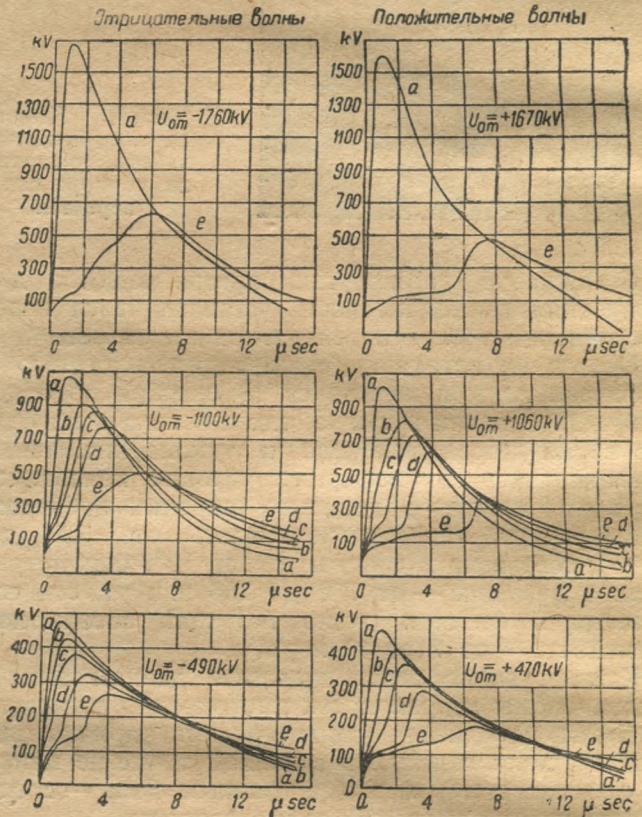


Рис. 5. Деформация волн $1/5 \mu \text{sec}$ при напряжении выше коронного. U_{om} — амплитуда исходной волны.

a, b, c, d и e — форма волны после пробега соответственно 0,10, 0,65, 1,13, 2,14 и 5,52 km

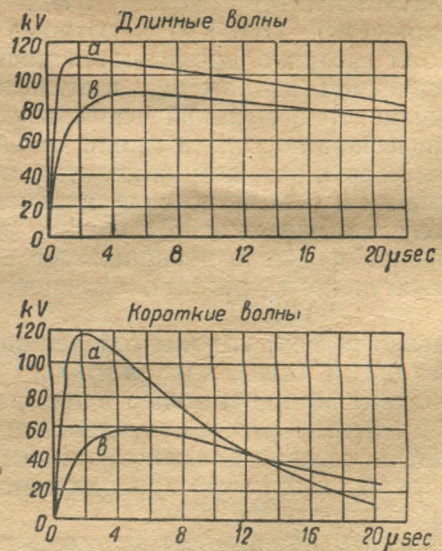


Рис. 6. Деформация положительных волн при напряжении ниже коронного
a — форма волны после пробега 0,1 km; б — 5,52 km

следует из рис. 6, при высоких напряжениях в основном определяется короной. Особенно отчетливо это проявляется в кривых относительного затухания рис. 7, где отложена амплитуда волны после пробега пути, указываемого абсциссой, отнесенная к амплитуде волны у генератора импульсов. Если положительная волна $1\frac{1}{5}$ μ sec с начальной амплитудой 116 kV после пробега 1 km теряет только 10% первоначального напряжения, то при начальном напряжении 470 kV волна этой формы теряет уже соответственно 23%; при 1060 kV — 29% и при 1670 kV — 38% напряжения. Таким образом при напряжении 1670 kV потеря напряжения благодаря короне почти в 4 раза превышает потери от всех других причин. (Сопротивление проводов и земли, емкость изоляторов. Емкость на линиях с деревянными опорами играет впрочем малую роль даже при влажной погоде.)

Различие в затухании волн разной полярности, но одинаковой амплитуды сказывается довольно сильно. Так, для волны с начальным напряжением 1000 kV относительное затухание на длине в 1 km для положительной волны составляет 0,7, а для отрицательной — 0,8. Для пути 5 km соответствующие числа равны 0,38 и 0,48. Таким образом различие в относительном затухании под влиянием полярности составляет величину 13—25%.

В этих же пределах лежит различие в затухании под влиянием полярности волн и для других напряжений.

Необходимо отметить резкое возрастание относительного затухания при переходе от волн с амплитудой 1000 kV к волнам с амплитудой 1700 kV. Повидимому, помимо потерь на корону, растущих примерно пропорционально квадрату напряжения, на затухании начинают сказываться неполные разряды, возникающие на изоляторах.

Деформация блуждающих волн, распространяющихся вдоль линии передачи Киселево — Снежная, при напряжении

выше коронного сопровождается образованием уступа на фронте (рис. 5—8), который по Бьюли [7, 8, 9] можно трактовать как разложение волны на две составляющие, движущиеся с различными скоростями. При напряжении ниже коронного образования уступа в наших опытах не наблюдалось вовсе, что можно отнести за счет сравнительно небольшого расстояния между плоскостями нулевого потенциала для электрического и магнитного поля.

Увеличение фронта волн $1\frac{1}{5}$ μ sec при пробеге вдоль линии передачи представлено на рис. 9. При этом для удобства сравнения длину фронта волны t_{11} после пробега пути l мы относили к первоначальной длине фронта волны у генератора импульсов t_{10} .

На пути в 1 km фронт коротких волн типа $1\frac{1}{5}$ μ sec увеличивается от 2 до 3,5 раза, на пути в 2 km — от 2,6 до 5,1 раза в зависимости от напряжения и полярности волн.

Интересно попутно отметить, что даже после пробега волной значительного пути на фронте остаются участки с довольно крутым подъемом напряжения.

Результаты опытов по затуханию длинных волн типа $1,5/40$ μ sec представлены на рис. 10 и 11, а на рис. 12 в качестве иллюстрации приведено несколько фотографий соответствующих осциллограмм.

Из рис. 10 следует, что заметный уступ на фронте положительной волны $+1,5/40$ μ sec 500 kV образуется значительно скорее, нежели у отрицательной (у положительной волны уступ виден после пробега 1 km, а у отрицательной незаметен даже после 2 km).

Затухание срезанных волн. На рис. 13, 14 приведены кривые затухания амплитуд срезанных волн, а на рис. 15 — некоторые из полученных серий кривых деформации. На рис. 16 в качестве иллюстрации приведено несколько фотографий осциллограмм затухания срезанных волн.

Рассмотрение рис. 13—16 приводит к следующим выводам.

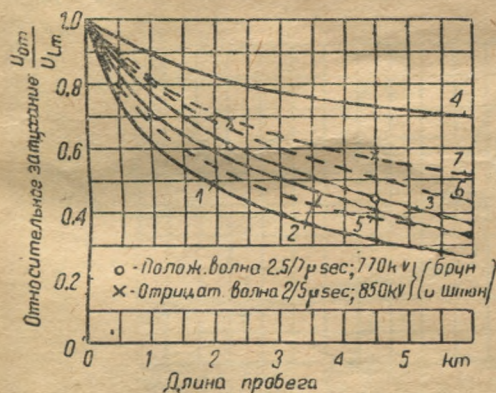


Рис. 7. Относительное затухание амплитуд блуждающих волн $1\frac{1}{5}$ μ sec

— 1	Полож. волна	$U_{0\text{ нах}} = 1670$ kV
— 2	"	$U_{0\text{ нах}} = 1060$ kV
— 3	"	$U_{0\text{ нах}} = 470$ kV
— 4	"	$U_{0\text{ нах}} = 116$ kV
- - - 5	Отриц. волна	$U_{0\text{ нах}} = 1760$ kV
- - - 6	"	$U_{0\text{ нах}} = 1100$ kV
- - - 7	"	$U_{0\text{ нах}} = 490$ kV

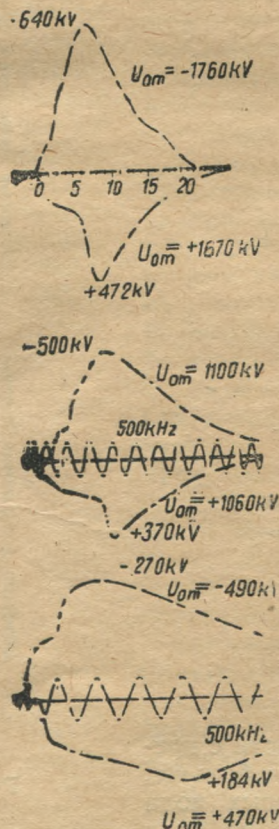


Рис. 8. Осциллограммы волн $1\frac{1}{5}$ μ sec после пробега 5,52 km вдоль линии передачи. $U_{0т}$ — амплитуда исходной волны

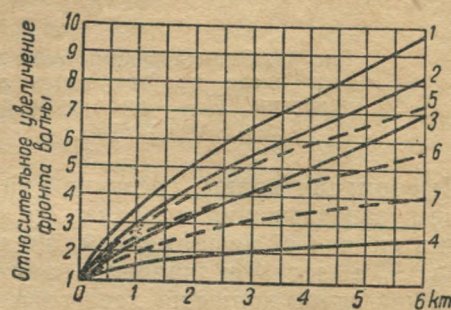


Рис. 9. Относительное увеличение фронта волн $1\frac{1}{5}$ μ sec при движении вдоль линии передачи

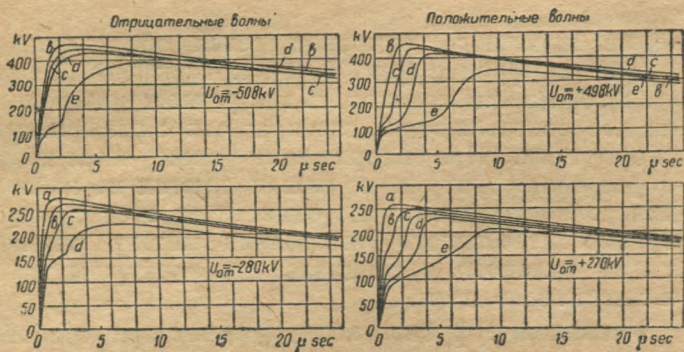


Рис. 10. Деформация длинных волн 1,5/40 μ sec при напряжении выше коронного. U_{0m} — амплитуда исходной волны; а, б, с, д и е — формы волн после пробега соответственно 0,10; 0,65; 1,13; 2,14 и 5,52 km

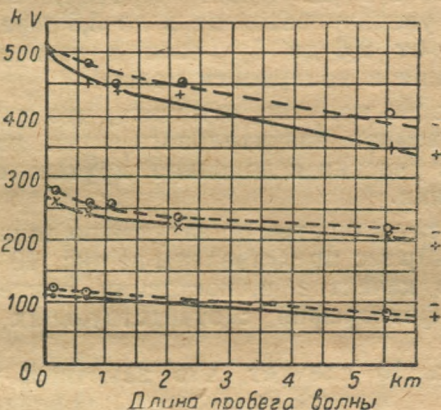


Рис. 11. Кривые затухания амплитуд волн 1,5/40 μ sec

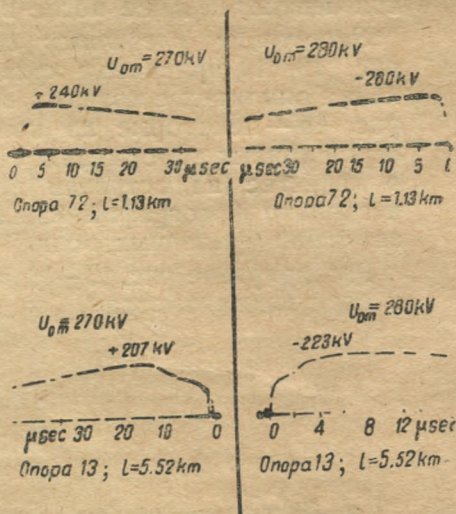


Рис. 12. Осциллограммы волн 1,5/40 μ sec после пробега вдоль линии передачи. U_{0m} — амплитуда исходной волны

Деформация волны, срезанной на хвосте с временем запаздывания порядка 2 μ sec и больше, очень сходна с деформацией аналогичных волн типа 1/5 μ sec. Увеличенное затухание за счет меньшей длины волны не дает возможности в положительной волне после пробега 5,52 km оформиться достаточно отчетливо второму всплеску

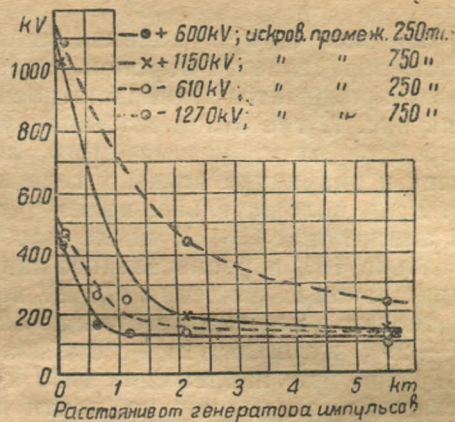


Рис. 13. Кривые затухания амплитуд срезанных волн

напряжения. Поэтому деформированная волна е рис. 15 по форме больше приближается к соответствующей полной волне 1/5 μ sec при 500 kV, нежели к более близкой по начальной амплитуде напряжения волне +1/3 μ sec, 1060 kV.

Место образования уступа на фронте срезанных волн (промежуток 750 mm) находится на той же высоте, что и у полных волн той же полярности. Это, повидимому, показывает, что в процессе образования импульсной короны основную роль играет фронт, по крайней мере до известных пределов длины волны.

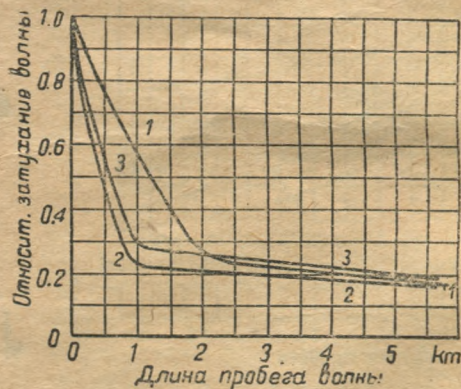
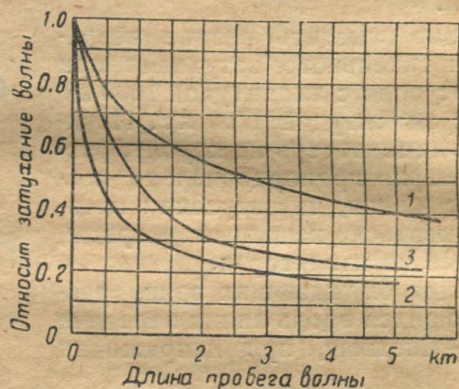


Рис. 14. Относительное затухание амплитуд срезанных волн.

- а) 1 — 1/5 μ sec, 900 kV (срез искров. промеж. 750 mm)
 2 — 1/5 " 900 " (" " " 750 ")
 3 — 1/5 " 610 " (" " " 250 ")
 б) 1 + 1/5 " 840 " (" " " 750 ")
 2 + 1/5 " 840 " (" " " 250 ")
 3 + 1/5 " 600 " (" " " 250 ")

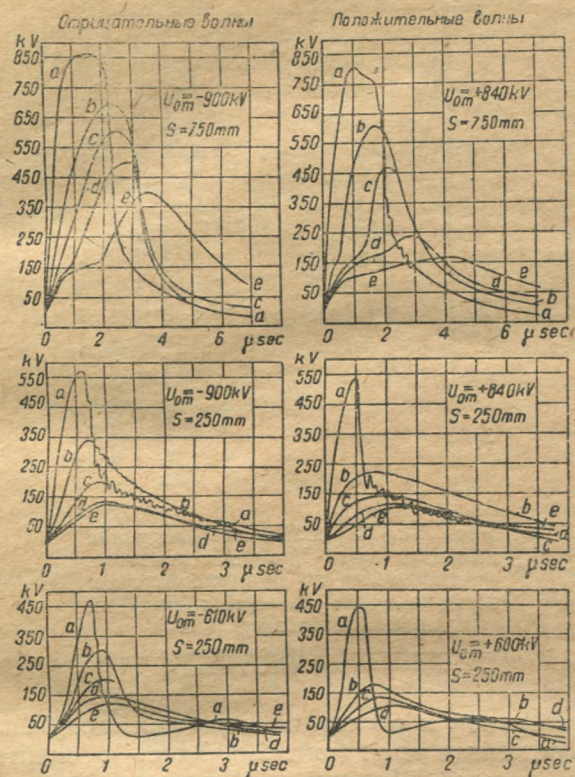


Рис. 15. Деформация срезаемых волн. Исходная волна $1/5 \mu\text{sec}$, U_{0m} — амплитуда ее; s — разрядное расстояние искрового промежутка; a, b, c, d и e — форма волн после пробега соответственно 0,10; 0,65; 1,13; 2,14 и 5,52 км

При срезе на фронте картина, однако, существенно изменяется. Уступа не образуется вовсе. Это обстоятельство, повидимому, в первую очередь объясняется тем, что уже после пробега первого километра напряжение волны, срезаемой на искровом промежутке 250 мм, падает до напряжения 150–200 кВ, которое лишь немного превышает напряжение начала короны.

Интересно отметить весьма сильное влияние полярности при срезе на промежутке 750 мм как в случае исходных волн с амплитудами $+840 U$ — 900 кВ, так и при исходных волнах $+1150 U$ — 1270 кВ.

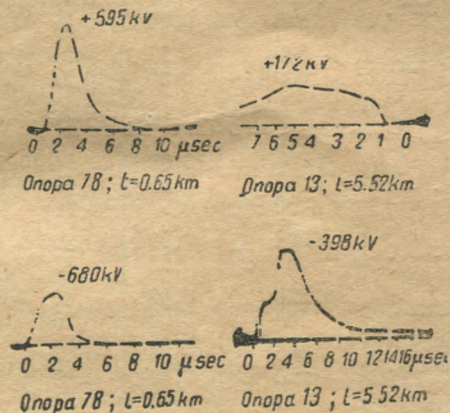


Рис. 16. Осциллограммы волн, срезаемых на промежутке 750 мм, после пробега l вдоль линии передачи. Напряжение исходной положительной волны $U_{0m} = +840 \text{ kV}$, отрицательной волны — 900 кВ

Напротив, при срезе на промежутке 250 мм, особенно при амплитуде напряжения исходной волны около 900 кВ, срез на фронте, эффект полярности значительно слабее. Повидимому, существенное уменьшение радиуса короны при очень короткой волне сглаживает различие между положительными и отрицательными волнами. Кроме того, как уже было отмечено выше, довольно быстро напряжение волны падает до 150–250 кВ, когда корона, а следовательно, и эффект полярности, вовсе перестают сказываться.

Сравнивая относительное затухание срезаемых волн, видим, что положительная волна с амплитудой $+840 \text{ kV}$, срезаемая на промежутке 250 мм через 2 км, затухает примерно до 46% первоначальной величины, а та же волна, срезаемая на промежутке 750 мм, — всего до 80%. На пути в 1 км соответствующие числа будут 24 и 59%. Аналогичные соотношения получаются и для отрицательных волн. Интересно, что волна, срезаемая на промежутке 250 мм (при напряжениях исходной волны 600 кВ и выше), претерпевает основное затухание на первом километре пути. Дальнейшее затухание сказывается сравнительно очень мало. Действительно, положительная волна $+1/5 \mu\text{sec}$, 840 кВ, срезаемая на промежутке 250 мм, на первом километре теряет около 77% напряжения, а на втором — только около 3% напряжения. Следующие 3 км также приводят к потере только 3% напряжения исходной волны. Эти же явления, хотя и в несколько менее резкой форме, наблюдаются у отрицательных волн.

Таким образом при данной исходной волне уменьшение длины искрового срезающего промежутка приводит к увеличению относительного затухания волны, и обратно, — при данной длине искрового промежутка уменьшение амплитуды исходной волны приводит к уменьшению относительного затухания.

Удлинение фронта срезаемых волн при их распространении вдоль линии передачи представлено на рис. 17. Вследствие упомянутого выше большого разброса, неизбежного при измерении срезаемых волн и, пожалуй, сильнее сказывающегося на длинах фронтов волн, чем на их амплитудах, на рисунке нанесены точки, соответствующие наибольшей и наименьшей из замеренных величин, тогда как кривая проведена по точкам, соответствующим средним арифметическим из всех измерений. Увеличение фронта срезаемых волн происходит медленнее, чем у полных волн того же напряжения. Значительное возрастание фронта имеет место только у волн со срезом на хвосте, т. е. когда распространяющаяся вдоль линии волна имеет достаточную длину и при условии достаточно высокого напряжения.

Формула Фауста и Менджера. Сопоставление кривых затухания блуждающих волн в линии Киселево — Снежная с известной эмпирической формулой Фауста и Менджера приводит к следующим выводам.

Полные волны типа $1/5$ и $1,5/40 \mu\text{sec}$ дают удовлетворительное совпадение с расчетными кривыми (рис. 18) при напряжении исходных волн до 1000 кВ. При повышении напряжения волны до 1700 кВ совпадение с формулой Фауста и Менджера становится значительно хуже

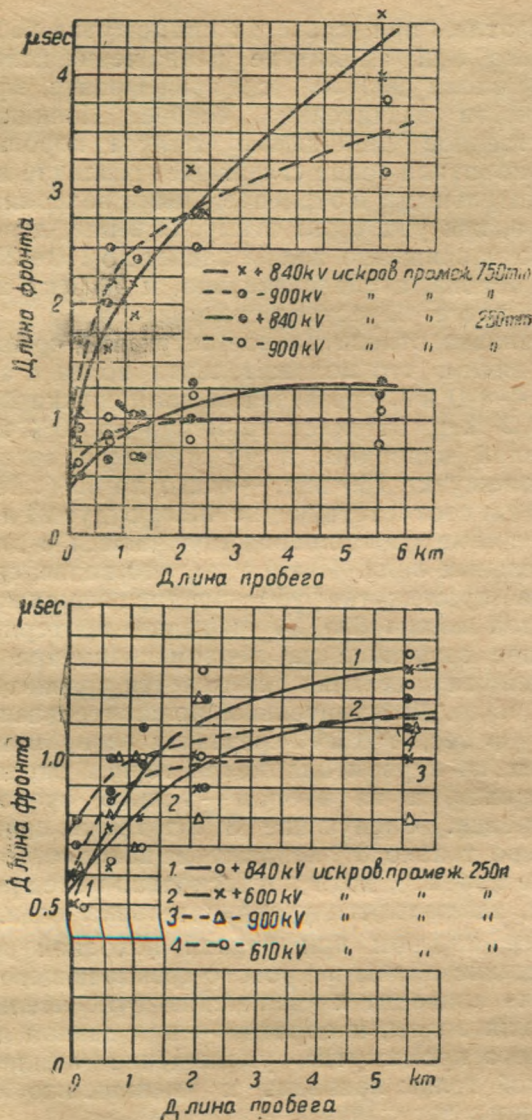


Рис. 17. Удлинение фронта срезаемых волн при движении вдоль линии передачи

(рис. 19), волны в начале своего пути (1—2 km) затухают быстрее, чем это следовало бы из формулы. Еще большие расхождения между экспе-

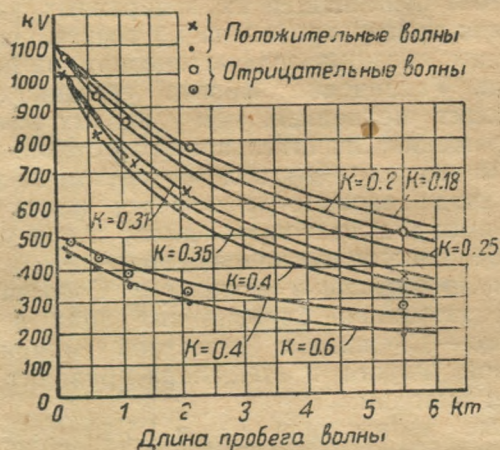


Рис. 18. Сопоставление затухания амплитуд волн $1,5 \mu \text{sec}$ с кривыми, построенными по формуле Фауста и Менджера для различных значений коэффициента затухания k

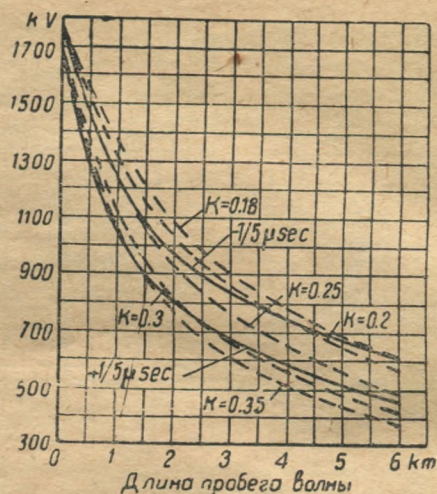


Рис. 19. Сопоставление затухания амплитуд волн $1,5 \mu \text{sec}$ с кривыми, построенными по формуле Фауста и Менджера для различных значений коэффициента затухания k .

— экспериментальные кривые;
--- расчетные кривые

риментальной и расчетной кривыми получаются для срезаемых волн (рис. 20). Здесь о применимости формулы Фауста и Менджера можно говорить лишь с большой натяжкой.

В таблице дана сводка значений коэффициента затухания в формуле Фауста и Менджера для

Полярность и форма исходной волны $\frac{t_1}{t_2}$	Амплитуда напряжения исходной волны kV	Относительное за- тухание после про- бега пути, km		Коэффициент затухания в формуле Фауста и Менджера $k \cdot 10^3$
		1	2	
Положительные волны				
$1/5 \dots \dots \dots$	1670	0,63	0,48	0,32—0,28*
	1060	0,71	0,60	0,30—0,32*
	470	0,78	0,64	0,64—0,60*
	116	0,89	0,83	—
$1,5/40 \dots \dots \dots$	489	0,89	0,84	0,19—0,15*
	270	0,89	0,85	0,26—0,20*
	113	0,96	0,92	—
$1/5$ срез 750 mm .	1150	0,37	0,18	1,62—1,93**
	840	0,60	0,30	0,83—1,39**
$1/5$ срез 250 mm	840	0,24	0,21	4,65—2,80**
	600	0,30	0,27	6,03—4,60**
Отрицательные волны				
$1/5 \dots \dots \dots$	1760	0,68	0,54	0,23—0,18*
	1100	0,80	0,69	0,18—0,19*
	490	0,82	0,72	0,51—0,31*
$1,5/40 \dots \dots \dots$	508	0,90	0,86	0,15—0,10*
	280	0,92	0,87	0,16—0,17*
$1/5$ срез 750 mm .	1270	0,62	0,40	0,52—0,68**
	900	0,69	0,56	0,49—0,43**
$1/5$ срез 250 mm .	900	0,38	0,23	2,84—2,56**
	610	0,42	0,29	2,72—2,34**

* Первое значение коэффициента затухания k соответствует пробегу 2,14, а второе — 5,52 km;

** Первое значение соответствует пробегу 1,13, а второе — 5,52 km;

*** Первое значение k соответствует 0,65, второе — 1,13 km.

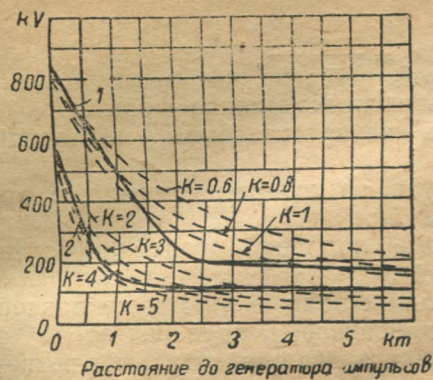


Рис. 20а. Сопоставление затухания амплитуд срезаемых волн с кривыми, построенными по формуле Фауста и Менджера для различных значений коэффициента затухания k .

— экспериментальные кривые;
— расчетные кривые. 1 — волна $+1/5 \mu \text{ sec}$, 840 kV; срез искров. промеж. 750 mm; 2 — волна $+1/5 \mu \text{ sec}$, 840 kV; срез искров. промеж. 250 mm

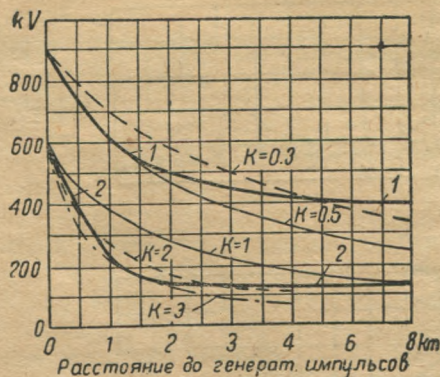


Рис. 20б. Сопоставление затухания амплитуд срезаемых волн с кривыми, построенными по формуле Фауста и Менджера для различных значений коэффициента затухания k .

— экспериментальные кривые;
— расчетные кривые. 1 — волна $-1/5 \mu \text{ sec}$, 900 kV, срез искров. промеж. 750 mm; 2 — волна $+1/5 \mu \text{ sec}$, 900 kV, срез искров. промеж. 250 mm

различных волн, исследованных в 1935 г. на линии передачи Киселево—Снежная.

Из таблицы и рис. 18, 19 следует, что даже в тех случаях, когда формула Фауста и Менджера применима, необходимо для затухания волн одной и той же формы и полярности принимать различные значения коэффициента затухания в зависимости от амплитуды исходной волны.

Последние данные заставляют думать о том, что вряд ли возможно установить сколько-нибудь надежную однозначную зависимость между коэффициентом затухания k и длиной волны λ , без учета амплитуды исходной волны.

Попытки применения к кривым затухания волн в линии Киселево—Снежная «улучшенных» формул типа

$$U = \frac{U_0}{1 + k^n U_0^m}$$

не привели нас пока к достаточно утешительным результатам. За счет увеличения числа производных параметров, конечно, можно лучше подогнать последнюю формулу к экспериментальной кривой. Однако получаемое при этом увеличение точности вряд ли оправдывает усложнение.

Найденные значения коэффициента затухания k для полных волн в общем не сильно отличаются от аналогичных средних американских данных, полученных при более низких напряжениях (для длинных волн в среднем $k=0,0001$, а для коротких $k=0,0002-0,0003$). Напротив, срезанные волны, в особенности при срезе на фронте, дали в некоторых случаях значения, в несколько раз превосходящие обычно принимаемые для срезанных волн.

Распространение волн одновременно по трем проводам. Измерения были произведены для волны $\pm 1/5 \mu \text{ sec}$ при начальной амплитуде около 1000 kV. На фронте волны, движущейся по трем проводам, даже после пробега 5,52 km не видно вовсе уступа, характерного для волн с напряжением выше коронного, распространяющихся по одному проводу. Здесь мы имеем полное соответствие с опытными данными Бруна и Итона [6] и выводами из многоскоростной теории Бьюли.

Коэффициент затухания для положительной волны (на пути 5,62 km) равен $k=0,61$ и для отрицательной — $k=0,43$.

Для волны почти такой же формы, несколько

более длинной, распространяющейся по одному проводу, было получено для k соответственно 0,32 и 0,19. Результат несколько неожиданный в свете распространенного мнения, что волна в трех проводах затухает быстрее, чем в одном⁴.

Это явление, очевидно, объясняется тем, что одновременное коронирование трех проводов вызывает большие потери энергии волны даже при относительно меньшем радиусе короны, чем в случае короны в одном проводе. При этом увеличение потерь на корону компенсирует с избытком усиленное затухание волны в одном проводе по сравнению с волной в трех проводах, вызванное разделением на многоскоростные составляющие.

Скорость распространения волн. Для определения скорости распространения блуждающих волн была поставлена серия опытов по отражению от открытого конца линии волн с различной начальной амплитудой.

Легко подсчитать для осциллограмм рис. 2Г, что положительная волна прошла путь $3,38 \cdot 2 = 6,76 \text{ km}$ за время $23,2 \mu \text{ sec}$, чему соответствует скорость распространения фронта $v_+ = 2,94 \times 10^5 \text{ km/sec}$, а для отрицательной волны можно найти $v_- = 2,90 \cdot 10^5 \text{ km/sec}$. Различие в результатах обоих опытов, очевидно, лежит в пределах ошибок измерений.

Изменение напряжения волны в пределах до 1000 kV для обеих полярностей приводило к скорости распространения фронта волны, равной 93—99% скорости света. Таким образом в пределах ошибок измерений скорость фронта не зависела в наших опытах от амплитуды и полярности.

Приведенные выше кривые деформации позволяют с известной степенью точности определить скорость распространения «медленной» составляющей волны.

Следуя Бьюли [7], необходимо было бы использовать осциллограммы основной и индуктированной волны в нескольких точках вдоль линии передачи (достаточно удаленных от генератора импульсов)

⁴ Интересно отметить, что величины k , подсчитанные нами на основании осциллограмм Бруна и Итона [6], приводят к аналогичным результатам для волны в одном проводе — 0,38 и 0,21, а для волны в трех проводах — 0,66 и 0,34 соответственно для положительной и отрицательной волны.

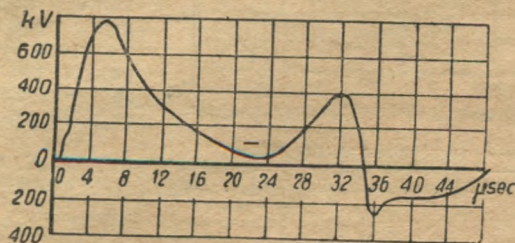
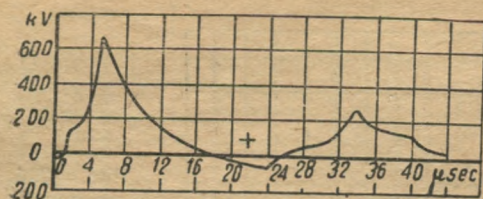


Рис. 21. Отражение волны от открытого конца линии. Катодный осциллограф на расстоянии 3,38 км от конца линии и 2,14 км от генератора импульсов

и произвести разложение волн на «многоскоростные» составляющие. После этого можно было бы определить скорость медленной волны.

Однако, повидимому, вследствие ряда упрощающих допущений, сделанных при выводе, предложенный Бьюли метод разделения волн представляет совершенно условный интерес и приводит на наших осциллограммах к результатам, плохо согласующимся даже в качественном отношении с рассуждениями самого Бьюли. Подробное рассмотрение этого вопроса выходит за рамки настоящей статьи.

Для определения скорости «медленной» составляющей можно применить более простой прием, производя измерения отставания «медленной» волны от фронта «быстрой» волны. При этом, очевидно, неизбежен значительный субъективизм в определении величины отставания, в большой мере зависящий от разнообразия форм деформированных волн и трудностей определения начала второго подъема на фронте волны. Как легко подсчитать,

$$v_2 = \frac{lv_1}{l + v_1 \Delta t},$$

где v_1 — скорость распространения фронта;

v_2 — скорость распространения «медленной» волны;

l — длина пути, на котором произошло отставание Δt ;

Δt — отставание «медленной» волны от фронта «быстрой».

Для положительных волн скорость медленной составляющей колебалась в пределах от 78 до 88% скорости света, а для отрицательных волн — от 86 до 91%, причем меньшие числа соответствуют волнам более высокого напряжения.

Подсчеты по формулам Бьюли и Фортескью дают для волны $1/5 \mu\text{sec}$, 1000 кВ довольно удовлетворительное совпадение, если при определении радиуса короны исходить из коронных градиентов $g_+ = 20 \text{ кВ/см}$ и $g_- = 30 \text{ кВ/см}$. Однако экспериментальная величина уступа на фронтах волн $+1,5/40 \mu\text{sec}$, 270 кВ и $-1,5/40 \mu\text{sec}$, 280 кВ совершенно не согласуется с расчетными данными⁵.

Литература

1. Сиротинский Л. И., Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках. ОНТИ, 1937, стр. 107.
2. Технический отчет ВЭИ. Деформация и затухание волн импульсов, 1935.
3. Беляков, Затухание и деформация коротких волн импульсов. «Электричество» № 23, 1936, стр. 38.
4. Калинин Е. В., Исследование перенапряжений в электрических установках. ОНТИ, 1936, стр. 92.
5. Потужный А. К. и Фертик С. М., Перевозной генератор импульсов. «Электричество» № 20, 1936.
6. O. Brune и I. Eaton, Experimental Studies in the Propagation of Lightning Surges. Tr. AIEE, sept. 1931, p. 1132.
7. L. Bewley, Attenuation and Distortion of Waves. El. Engng., v. 52, 1933, p. 876.
8. L. Bewley, Attenuation and Distortion of Waves. El. Engng., 1934, p. 1749.
9. L. Bewley, Resolution of Surges Into Multivelocity Component. El. Engng., 1935, p. 1199.

⁵ Публикуемое исследование было выполнено под руководством заведующего кафедрой передачи электрической энергии ХЭТИ проф. В. М. Хрушова. Следует также отметить участие в исследовании сотрудников Донэнерго инженеров Е. С. Гройса, М. М. Акодиса и Г. О. Лысаковского.