ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա № 1, 1957 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Р. А. ГРДЗЕЛЯН, И. Г. ДЖАНДЖУГАЗОВ, М. М. КАРАПЕТЯН, А. С. ТОРОСЯН

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА КОРОНУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*

В связи с развитием высоковольтных электрических сетей, исследование короны переменного тока на опытных линиях в высокогорных районах при пониженных атмосферных давлениях имеет теоретический и практический интерес. Состояние развития науки в области короны не позволяет достаточно точно определять потери электроэнергии на корону вообще, и особенно в условиях горных районов. Предложенные различными авторами методы расчета потерь на корону [1,2,3] обычно являются результатом обобщения экспериментального материала, не имеющего достаточного теоретического обоснования и потому не могут быть распространены на весь диапазон применяемых марок проводов и на различные метеорологические условия. Сравнение подсчетов по различным формулам показывает, что по ряду факторов они не приводят к однозначным результатам.

За последние годы учет потерь энергии на корону производится на основании экспериментального исследования на опытных пролетах, в условиях близких к эксплуатации.

Одним из основных факторов, влияющих на величину потерь на корону в высокогорных условиях, является пониженная плотность воздуха. Влияние относительной плотности воздуха (δ) на величину потерь электроэнергии на корону показано на рис. 1, где приводятся полученные нами зависимости потерь мощности на корону от электростатического градиента на поверхности провода АС-150** при различных относительных плотностях воздуха. Как показывают полученные данные, при хорошей погоде изменение относительной плотности воздуха на несколько процентов приводит к изменению потерь мощности на корону при данном градиенте в сотни процентов.

Лаборатория электротехники АН Армянской ССР занимается исследованием потерь на корону на опытных пролетах в высокогорных условиях—порядка 1100—2000 метров над уровнем моря. В 1955 году были начаты проектно-исследовательские работы и сооружение двух опытных установок напряжением 250 кв в следующих пунктах [3]:

1) В районе Норка гор. Еревана на высоте 1100 метров над уров-

* В разработке схемы участвовала Вильчур Л. М.

** Под электростатическим градиентом понимается величина электростатического градиента, которая была бы на поверхности провода при отсутствии короны.

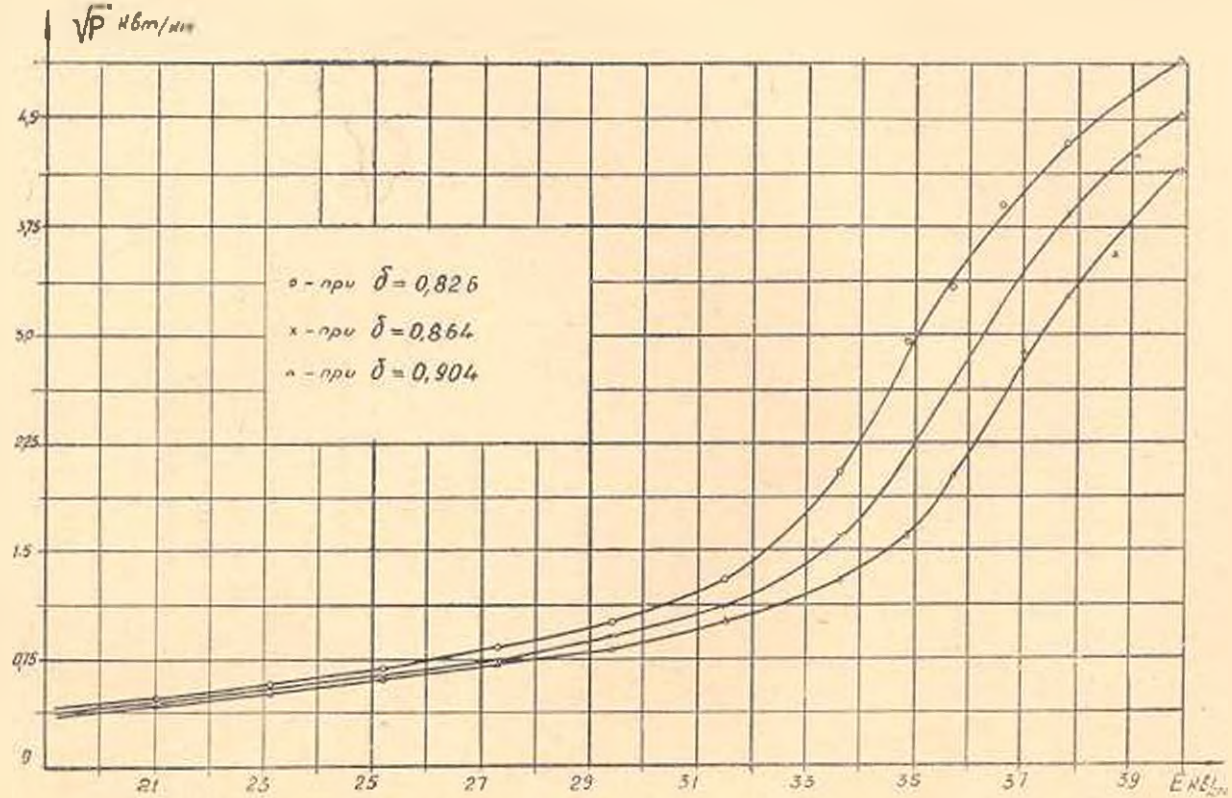

Рис. 1. Кривые зависимости потерь на корону от напряженности поля на поверхности провода АС-150 при различных плотностях воздуха. (Данные ЛЭАН).

нем моря. Эта установка имеет два пролета, один с активной длиной 45 метров, другой—5 метров, для одновременного исследования потерь на корону на различных проводах. На первом пролете был подвешен провод АС-150, на втором—АСУ-300.

2) В г. Севан на высоте порядка 2000 метров над уровнем моря. Установка имеет пролет длиной 16 метров с проводом АСУ-300.

Первоочередной задачей исследований на этих установках является определение годовых потерь электроэнергии на корону в линии передачи 220 кв. Атарбекян—Татев.

Экспериментальная установка для измерения потерь на корону состоит из следующих основных частей: высоковольтного испытательного трансформатора 250 кв, 160 ква; измерительного устройства; опытных пролетов; метеорологической установки

Измерение мощности потерь на корону имеет свои специфические стороны. При напряжениях на проводе, близких к критическому напряжению короны, ток, создающий потери на корону, представляет собой весьма малую долю тока коронирующей линии. Измерение мощности при малых $\cos\varphi$ представляет довольно трудную задачу, поэтому измерения с первичной стороны высоковольтного трансформатора или же с помощью трансформаторов тока и напряжения сопряжены с большими погрешностями. В настоящее время более целесообразно использование схем, позволяющих производить измерения со стороны высокого напряжения с компенсацией тока геометрической емкости линии, имеющего место при тех же напряжениях, но при отсутствии короны.

Принципиальная схема измерения потерь на корону, примененная на указанных установках, приведена на рис. 2 и 3. Компенсация тока геометрической емкости линии производится при помощи конденсатора без потерь (C_k). Измерения мощности производятся специальным милливаттметром, обмотка напряжения которого питается или через емкостной делитель с электронным устройством, или же через омический делитель с компенсированным трансформатором (Т-1).

При напряжениях ниже коронного, для принятой схемы, должно удовлетворяться условие

$$R_1 \cdot C_k = R_2 \cdot C_k, \qquad (1)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления плеч схемы, C_k – геометрическая емкость линии, при которой через милливаттметр ток не течет, так как точки 1 и 2 имеют одинаковый потенциал.

При напряжениях выше коронного через токовую обмотку милливаттметра потечет ток неуравновешивания, обусловленный короной. Этот ток не является чисто активным, так как коронирующий провод окружен объемными зарядами, увеличивающими емкость линии.

Соотношение компенсированного тока короны I_k (ток через ветвь

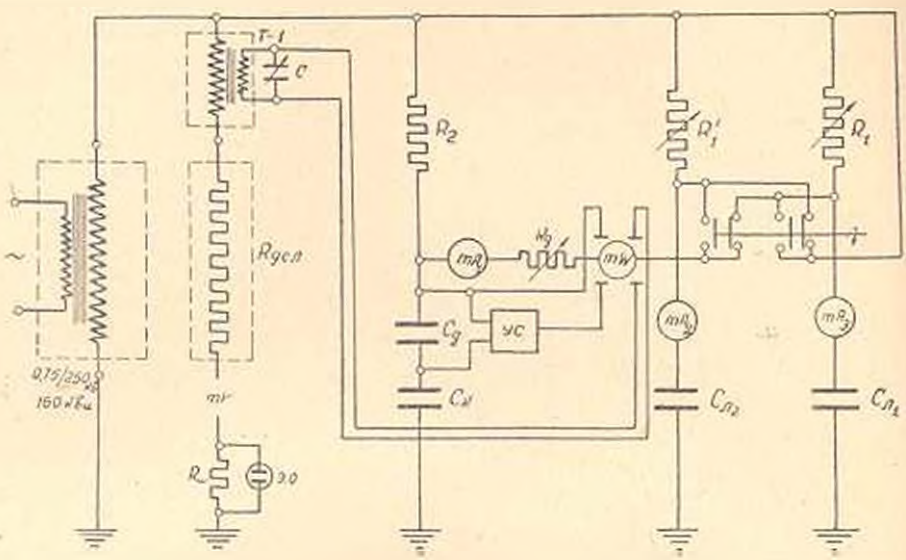

Рис. 2. Принципиальная схема измерения потерь на корону.

$\Delta C_л$, r, рис. 4.) к току неуравновешивания $\dot{I}_0$ является коэффициентом пересчета по току (K_i).

Для анализа схемы и определения коэффициента K_i произведен расчет токораспределения схемы по методу контурных токов (рис. 4). Для упрощения расчета нелинейная вольт-амперная характеристика короны линеаризирована.

Обозначим через

R_0 — сопротивление диагонали; r — сопротивление, имитирующее потери на корону; $\Delta C_л$ — приращение емкости линии из-за короны; C_k — компенсирующая емкость; $I_л$ — ток коронирующей линии; $\dot{I}_k$ — компенсированный ток короны (первой гармоники); $\dot{I}_0$ — ток неуравновешивания.

Пренебрегая сопротивлением источника тока, составляя соответствующие уравнения и решая их, получим:

$$\dot{I}_л = \dot{U}\frac{R_0R_2 + \frac{1}{j\omega C_k}(R_1 + R_2 + R_0)}{R_2(R_0R_1 + R_0Z_л + R_1Z_л) + \frac{1}{j\omega C_k}\left[(R_0 + R_2)(R_1 + Z_л) + R_1Z_л\right]} \quad (2)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{U}\frac{R_2Z_л - \frac{R_1}{j\omega C_k}}{R_2(R_0R_1 + R_0Z_л + R_1Z_л) + \frac{1}{j\omega C_k}\left[(R_0 + R_2)(R_1 + Z_л) + R_1Z_л\right]} \quad (3)$$

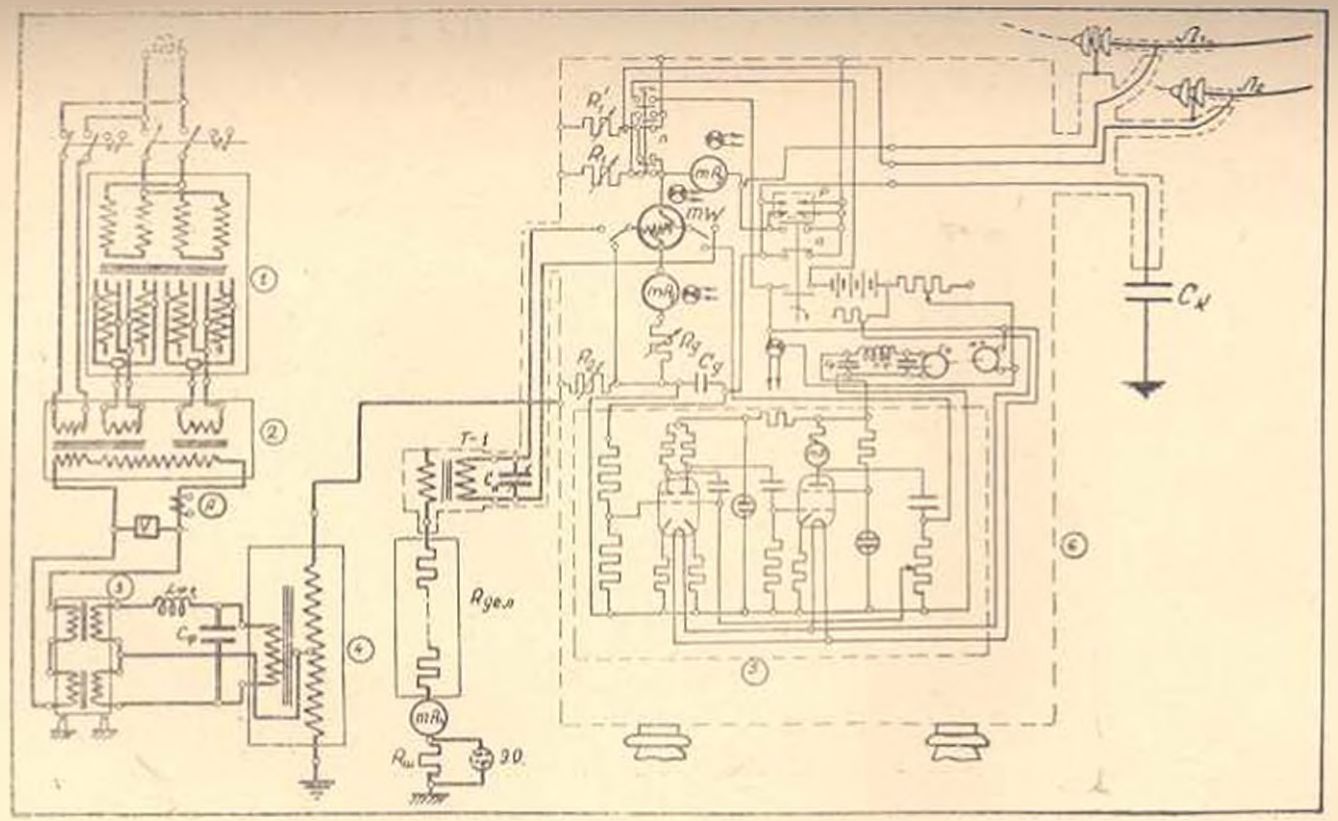

Рис. 3. Полная принципиальная схема опытной установки для измерения потерь на корону.

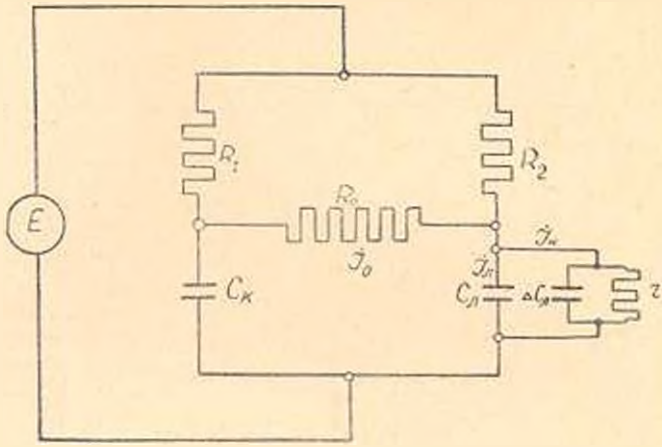

Рис. 4. Расчетная схема токораспределения.

Компенсированный ток короны

$$\dot{I}_к = \dot{I}_л Z_л \left(\frac{1}{r} + j\omega \Delta C_л \right) \tag{4}$$

$$\dot{I}_к = \dot{U} \frac{\left[R_0 \cdot R_2 + \frac{1}{j\omega C_л} (R_0 + R_1 + R_2) \right] \cdot Z_л \left(\frac{1}{r} + j\omega \Delta C_л \right)}{R_2 (R_0 R_1 + R_0 Z_л + R_1 Z_л) + \frac{1}{j\omega C_л} \left[(R_0 + R_2)(R_1 + Z_л) + R_1 Z_л \right]} \tag{5}$$

где

$$Z_л = \frac{\frac{1}{r} + j\omega (C_л + \Delta C_л)}{\frac{1}{r^2} + \omega^2 (C_л + \Delta C_л)^2}$$

Отношение $\dot{I}_к$ к $\dot{I}_0$ и есть искомый коэффициент пересчета показаний схемы по току (K_i). Подставляя значения $\dot{I}_0$ и $\dot{I}_к$ из уравнений (2) и (5), после некоторых преобразований получим:

$$K_i = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0 \cdot R_2}{R_1 \cdot j\omega C_л} \tag{6}$$

Мнимая часть коэффициента представляет весьма малую величину, так как сопротивления приборов и плеч схемы примерно в 10^3—10^4 раза меньше реактивного сопротивления $C_л$. Поэтому, пренебрегая мнимой частью уравнения (6), получим:

$$K_i = 1 + \frac{R_0 + R_2}{R_1}. \tag{7}$$

Как видно, K_i есть величина действительная (при пренебрежении мнимой частью) и постоянная, зависящая от постоянных параметров схемы, что исключает фазовые ошибки. Коэффициент K_i не зависит от

гармонических составляющих тока, что для измерения потерь на корону весьма существенно. При измерениях потерь на корону по указанной схеме наименьший возможный предел измерения ограничивается с одной стороны чувствительностью милливаттметра, а с другой стороны чувствительностью схемы по току $\frac{1}{K_i}$.

Из уравнений 1 и 7 видно, что чувствительность схемы по току, при заданном пролете, можно увеличить либо увеличением емкости компенсирующего конденсатора, либо пропорциональным увеличением сопротивлений R_1 и R_2.

Увеличение емкости компенсирующего конденсатора без потерь, с рабочим напряжением несколько сотен киловольт, ограничивается, обычно, техническими возможностями.

Увеличение же чувствительности схемы, путем увеличения сопротивлений плеч, ограничивается увеличением разности потенциалов между экраном и измерительными проводами схемы, которая приводит к увеличению погрешности схемы из-за увеличения емкостных паразитных токов. Оптимум величины сопротивлений R_1 и R_2 устанавливается в процессе наладки, так как математическое их определение с учетом паразитных емкостных токов, которые не поддаются расчету, не представляется возможным. Увеличение же длины пролета при данной C_k, с целью увеличения потерь, приводит к уменьшению чувствительности схемы почти на такой же порядок, как и увеличение самих потерь. Поэтому увеличение длины опытного пролета не вполне оправдывается, тем более, что длинный пролет вследствие большого провеса имеет неравномерную напряженность поля на проводе вдоль пролета.

Подача напряжения к обмотке напряжения милливаттметра предусмотрена следующими двумя способами (рис. 2 и 3):

1) от емкостного делителя напряжения через электронное устройство;

2) от омического делителя напряжения через компенсированный трансформатор.

Отбор напряжения в первом случае осуществляется от конденсатора C_g, включенного последовательно с C_k.

Электронное устройство представляет из себя трехкаскадный усилитель с большим входным сопротивлением и с обратной отрицательной связью по току и по напряжению для компенсации сдвига фаз между напряжением на пролете и выходным напряжением электронного устройства.

При использовании омического делителя, с целью уменьшения его мощности, применяется трансформатор с весьма малой индукцией и током холостого хода. Первичная обмотка трансформатора включается последовательно в цепь омического делителя со стороны высокого напряжения. Для компенсации сдвига фаз напряжения, вследствие реактивной мощности делителя и индуктивности трансформато-

ра, применяется конденсатор C_k. Эта компенсация постоянная, так как конструкция омического делителя исключает появление короны на элементах делителя и, кроме того, параметры трансформатора Т-1, в пределах измерения, практически остаются постоянными.

Потери мощности на корону на опытном пролете определяются следующей зависимостью:

$$W_{действ.} = K_{общ.} \cdot W_{измер.}$$

где $W_{действ}$ — действительная мощность потерь на корону на проводе.

$W_{изм.}$ — мощность по милливаттметру.

$K_{общ.}$ — общий пересчетный коэффициент по мощности.

При питании обмотки напряжения милливаттметра от емкостного делителя с электронным устройством

$$K_{общ.} = \frac{K_{д_1} \cdot K_I}{K_y} = K_I \cdot K_H,$$

где $K_{д_1}$ — коэффициент деления емкостного делителя,

K_I — коэффициент пересчета по току,

K_y — коэффициент усиления электронного устройства,

K_H — коэффициент пересчета по напряжению.

При питании обмотки напряжения милливаттметра от омического делителя с компенсированным трансформатором

$$K_{общ.} = \frac{K_{д_2} \cdot K_I}{K_T} = K_I \cdot K_H,$$

где $K_{д_2}$ — коэффициент деления омического делителя,

K_T — коэффициент трансформации компенсированного трансформатора,

K_H — коэффициент пересчета по напряжению.

Измерения на двух проводах ведутся одной и той же схемой с возможностью переключения схемы с одного пролета на другой без снятия напряжения. При этом сопротивление R_2 остается постоянным, а R_1 меняется на R'_1, соответственно емкости переключенного пролета.

Высоковольтная часть измерительной схемы находится в экранированном ящике, изолированном от земли (рис. 5).

Там же находится аккумуляторная батарея с умформером для питания электронного устройства и освещения измерительных приборов.

Наблюдения за измерительными приборами производятся дистанционно при помощи оптического прибора и зеркал. Отключение (шунтировка) и включение измерительной части схемы, переключение схемы с одного пролета на другой, а также переключение предела измерения (чувствительности) схемы производятся также дистанционно без снятия напряжения.

Высоковольтный электрод компенсирующего конденсатора представляет из себя диск эллипсоидального сечения диаметром 3 *м*.

В некоторых случаях этот электрод заменяется цилиндрическим. Емкость диска относительно земли 135 пф., емкость цилиндра—70 пф.

Омический делитель собран из керамических сопротивлений, помещенных в кожухе высоковольтного изолятора, заполненного маслом (рис. 6).

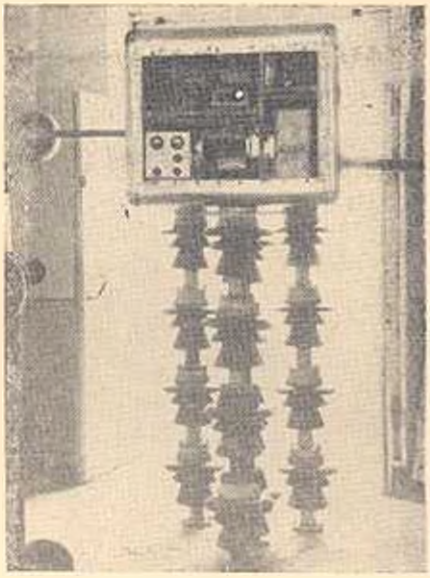

Рис. 5. Общий вид измерительного ящика с открытой крышкой.

Для предотвращения влияния утечек по поверхности изолятора на верхнем и нижнем фланцах кожуха делителя установлены проходные изоляторы, а фланцы кожуха делителя соединяются соответственно с потенциалом измерительного ящика (экрана) и землей. Измерение напряжения производится миллиамперметром (mA_4), включенным в цепь омического делителя.

Экраны подводящих проводов (алюминиевые трубы) имеют потенциал измерительного ящика. Этот потенциал подводится также к первым изоляторам начальных гирлянд пролетов. Для предотвращения влияния краевого эффекта на малом пролете с двух концов надеты экранирующие трубы ⌀ 50 *мм*, длиной 1,5 *м*. Подача потенциала экрана к экрану конечной гирлянды малого пролета осуществлялась спуском от экрана большого пролета (рис. 7 и 8), который предназначен для предотвращения влияния малого пролета на большой. Однако, как выявилось в процессе экспериментов, путем снятия вольт-кулоновых характеристик методом антенны, разработанным в ЭНИН-е АН СССР, распределение градиента вдоль малого пролета оказалось неравномерным. Для предотвращения влияния спуска на равномерность градиента вдоль провода, экранировка конечной гирлянды малого пролета произведена соединением ее с потенциалом экрана посредством пропускания внутрь повива провода пролета тонкой изолированной проволоки. Следует отметить, что в этом случае расчетная и измеренная величины емкости линии практически совпадают.

Наладка схемы. Так как измерительная установка состоит из многих узлов, то возможные ошибки их могут складываться и дойти до недопустимой величины, поэтому погрешность каждого узла определялась в отдельности, а затем определялась погрешность установки в целом.

Погрешности схемы могут быть как по причине угловых погрешностей, так и погрешностей по абсолютной величине.

Общая погрешность схемы складывается из погрешности емкостного делителя по коэффициенту деления и по углу между пол-

ным напряжением на делителе и на его плече C_3; погрешности усилителя по коэффициенту усиления и по углу между векторами входного и выходного напряжений; угловых погрешностей вследствие наличия индуктивности у обмоток тока и напряжения милливаттметра и обмотки милли-

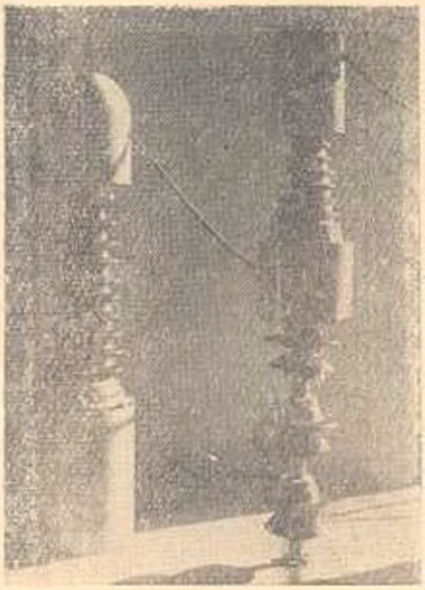

Рис. 6. Общий вид делителя напряжения на 250 кв.

амперметра; погрешности по величине и по углу омического делителя; погрешности по коэффициенту трансформации и по углу компенсированного трансформатора Т-1; погрешности остальных измерительных приборов.

Все указанные погрешности могут привести к изменению расчетной величины коэффициента $K_{общ.}$. Причем, изменение коэффициента $K_{общ.}$ может быть как по абсолютной величине, так и с добавлением к нему мнимой части вследствие угловых ошибок схемы. Следует указать также, что схема с использованием омического делителя с трансформатором Т-1 ставит весьма жесткие требования к форме кривой напряжения. Для получения синусоидальной кривой напряжения со стороны первичной обмотки высоковольтного трансформатора был включен Г-образный фильтр (рис. 3).

Параметры фильтра подбирались осциллографированием формы кривой напряжения на омическом делителе напряжения. Не входя в подробности наладки отдельных узлов измерительной схемы, приведем последние два этапа наладки, определяющие качество измерительной схемы в целом.

1. Проверка отсутствия угловых погрешностей схемы производилась при $U<U_n$ путем искусственного выведения схемы из уравновешивания. При этом ток неуравновешивания доводился до трехкратной величины номинального тока милливаттметра. Отсутствие показаний милливаттметра в этом случае указывает на отсутствие угловых погрешностей в схеме в целом. При наличии же угловых погрешностей угол между векторами тока и напряжения был бы менее 90° и милливаттметр показал бы фиктивную мощность.

2. Определение общей погрешности измерений производилось путем определения мощности по схеме при включении в линию заранее известной нагрузки. Обычно эта нагрузка представляет собой активное сопротивление, включенное в рассечку линии в ее начале (рис. 9). Как показали измерения и анализ работы схемы, в этом случае результаты искажаются вследствие протекания сравнительно

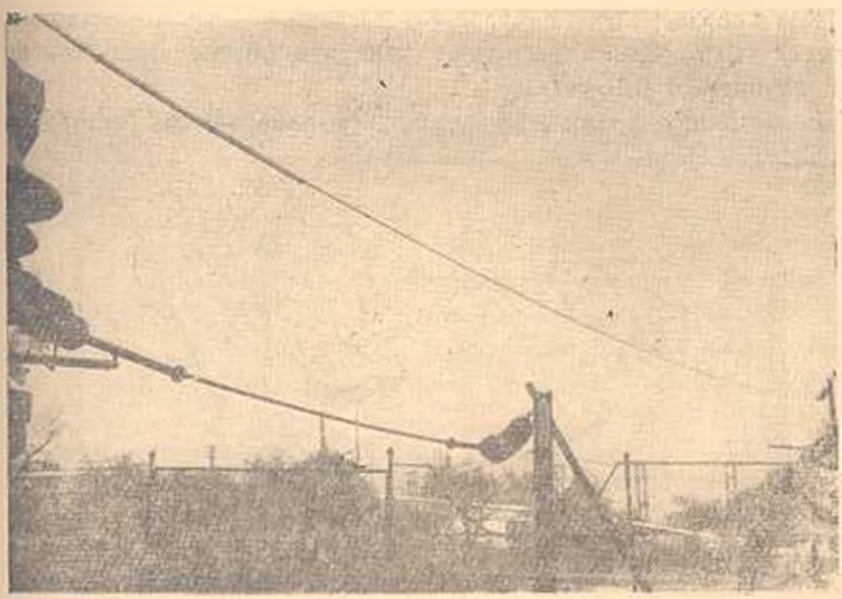

Рис. 7. Общий вид большого и малого пролетов.

больших паразитных токов, обусловленных большой разностью потенциалов между компенсирующим конденсатором, экраном и линией. Эта разность потенциалов равна падению напряжения на нагрузочном сопротивлении. Во избежание указанных искажений, нагрузочное со-

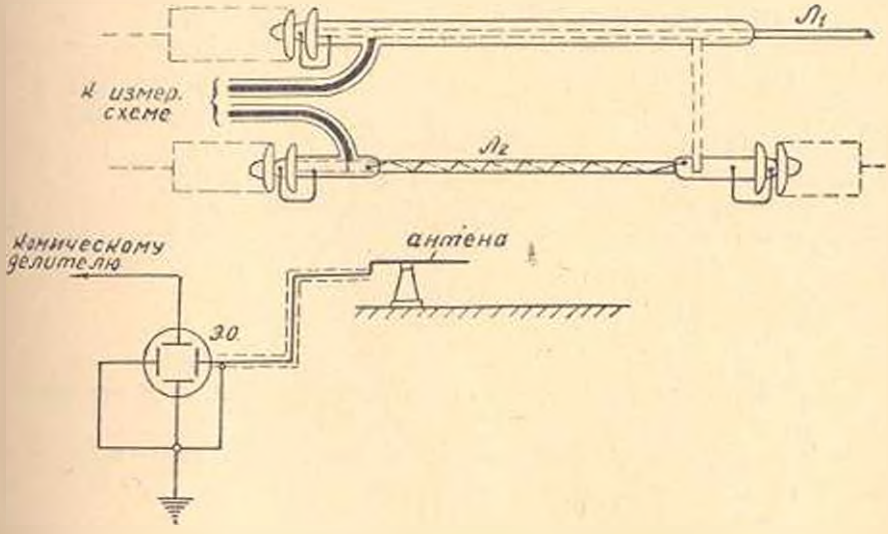

Рис. 8. Принципиальная схема экранирования пролетов и измерения вольт-кулоновой характеристики с помощью антенны.

противление включалось параллельно с линией. В этом случае компенсирующий конденсатор, экран и линия находятся, практически, под одним и тем же потенциалом, что соответствует реальной работе схемы при измерениях потерь на корону.

Как показали измерения, точность схемы в целом находится в пределах ±5%. Схема позволяет измерять потери мощности на корону, начиная от 0,1 *вт/м*.

В настоящее время одновременно с измерениями потерь на ко-

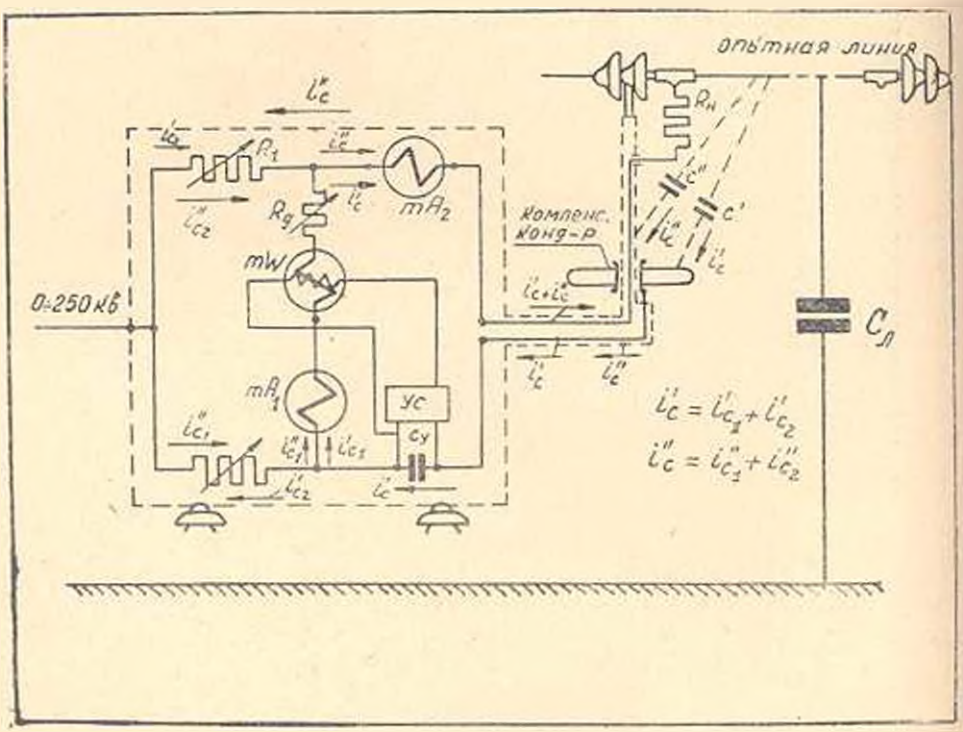

Рис. 9. Схема измерения общей погрешности измерения путем включения сопротивления в рассечку линии. На схеме указаны паразитные токи.

рону ведутся необходимые метеорологические наблюдения.

Измерительная схема сооруженной установки на высоте 2000 метров над уровнем моря принципиально однотипна с описанной схемой.

Лаборатория электротехники
АН Армянской ССР

Ռ. Ա. ԳՐԴԶԵԼՅԱՆ, Ն. Գ. ՋԱՆՋՈՒԳԱԶՈՎ, Մ. Մ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա. Ս. ԹՈՐՈՍՅԱՆ

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՊԱՅԿԻ ՎՐԱ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՉԱՓՄԱՆ ՍԽԵՄԱ

Ամփոփում

Բարձր լարման էլեկտրական ցանցերի զարգացման հետ կապված՝ փոփոխական հոսանքի պայկի հետազոտումը փորձնական դծերի վրա բարձրակարգային պայմաններում, ցածր մթնոլորտային ճնշման տակ, ունի էական պրակտիկ նշանակություն։ Այդ հետազոտություններն ուղեկ և

տեսական նշանակություն, որովհետև պակի տապարիզում դիտության զարգացման ժամանակակից դրություններ թույլ չի տալիս որևէ կերպ ճիշտ որոշել էլեկտրաէներգիայի կորուստները պակի վրա՝ ընդհանրապես և մասնավորապես՝ լեռնային պայմաններում։

Այդ կապակցությամբ 2 փորձնական գծերի վրա (ծովի մակերևույթից 1100 մ բարձրության վրա՝ Երևան-Նորքում և 2000 մ-ի վրա Սևանում) պակի կորուստները չափելու համար մշակված և կիրառված է չափման սխեմա։ Այդ սխեման միացվում է բարձր լարման շղթայում և աշխատում է հավասարակշռված կամրջակի սկզբունքով։ գծի սեակտիվ հոսանքի կոմպենսացմամբ։

Պակի վրա կորուստների վերահաշվումը կատարվում է իրական հաստատուն գործակիցներով, որոնք կախված են միայն սխեմայի հաստատուն պարամետրերից։

Սխեմայի ճշտությունը $\pm 5\%$ է։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сиротинский Л. И.* Техника высоких напряжений, ч. I, 1951. Госэнергоиздат.
2. Отчет ЭНИН-а АН СССР. Коронный разряд на линиях 400 кв. 1949.
3. Отчет Лаборатории электротехники АН Армянской ССР (ЛЭАН). Исследование короны переменного тока при пониженных плотностях воздуха. Часть I и II, 1954—1955 годы.