

М. М. Карапетян, А. С. Торосян

Защитный промежуток ЗП-1 для цепи 1000 вольт передвижной подстанции электротракторного агрегата

Передвижная подстанция электротракторного агрегата служит для питания электротрактора. Посредством токосъема она подсоединяется в любом месте к полевой сети 6—10 кВ и питает электротрактор по кабелю напряжением 1,0 кВ. (фиг. 1).

Опасные перенапряжения в цепи 1,0 кВ. передвижной подстанции появляются:

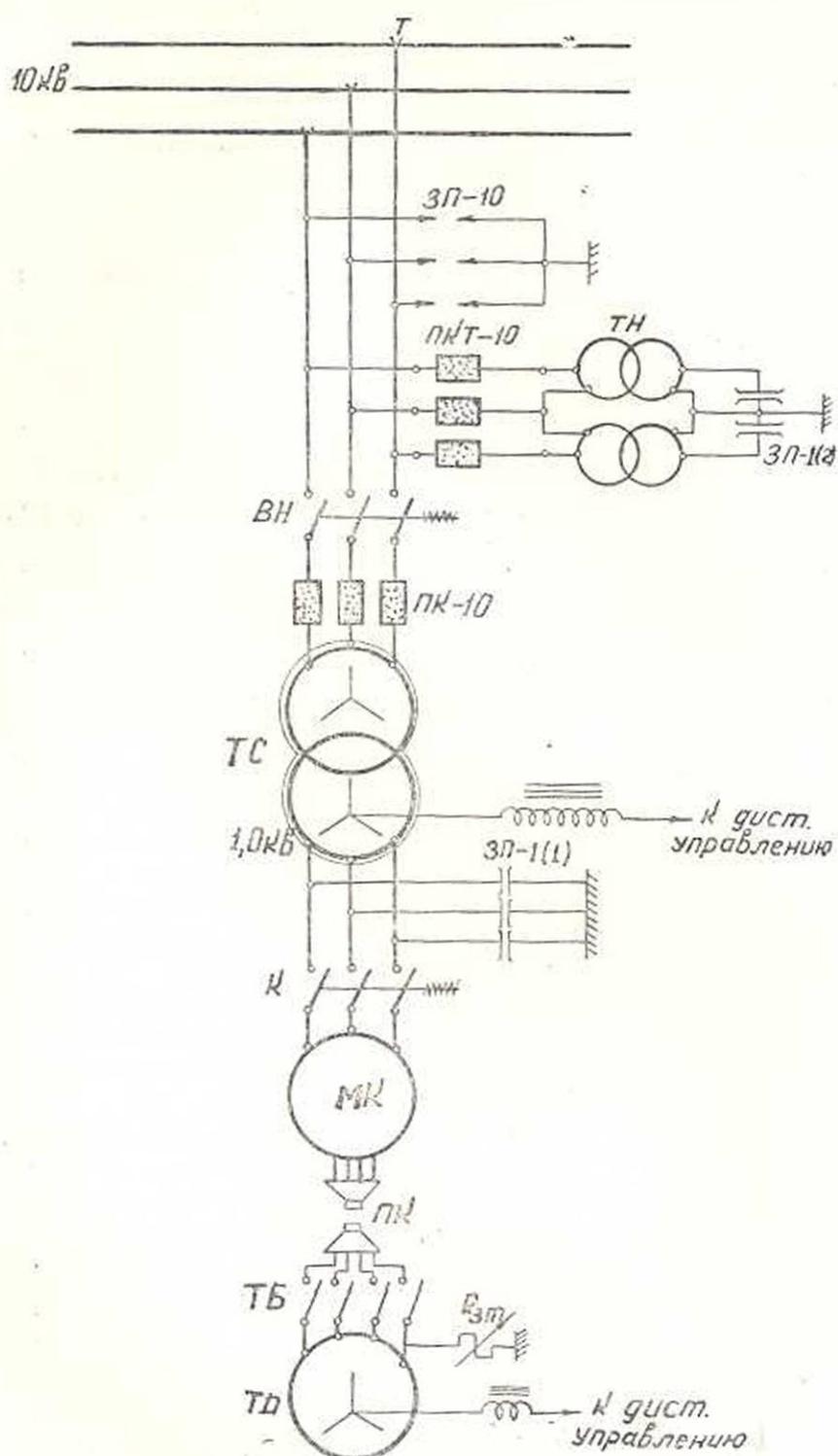
- 1) при атмосферных перенапряжениях вследствие перехода блуждающих волн от обмотки 6—10 кВ на обмотку 1,0 кВ;
- 2) при повреждении главной изоляции между обмотками силового трансформатора.

В первом случае рассмотрение волнового процесса с учетом подпора напряжения на корпусе подстанции вследствие срабатывания защитных промежутков ЗП-10 показывает, что разность потенциалов между обмоткой 1,0 кВ и корпусом может иметь опасную величину. Для предотвращения пробоя изоляции обмотки трансформатора необходимо ее шунтировать. Эту функцию должен выполнить защитный аппарат.

Во втором случае защитный аппарат выполняет роль пробивного предохранителя.

Рассмотрение существующих защитных аппаратов, а именно: вентильного, трубчатого разрядника и пробивных предохранителей линии связи [3], показывает, что требованиям защиты изоляции обмотки 1,0 кВ силового трансформатора указанные аппараты не могут удовлетворять. Следует отметить, что эти аппараты предназначены для стационарных устройств и завод-изготовитель не гарантирует их работу на передвижных установках, кроме этого таких аппаратов на номинальное напряжение 1,0 кВ не выпускается. Поэтому нами разработан специальный защитный промежуток ЗП-1 (фиг. 2).

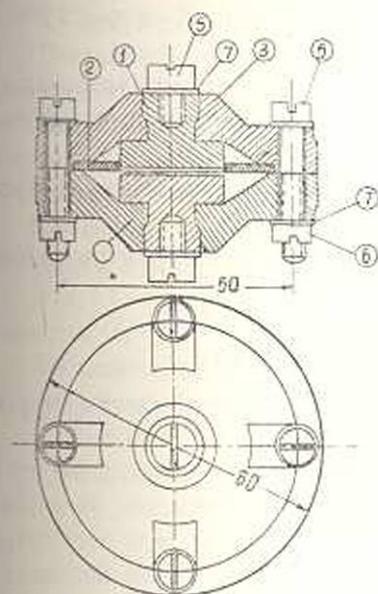
Защитные промежутки должны быть установлены на трех фазах. Установка защитных промежутков на всех трех фазах силового трансформатора не может привести к появлению сопровождающего тока трехполюсного короткого замыкания в цепи 1,0 кВ. Действительно, при появлении блуждающих волн у места присоединения подстанции долж-



Фиг. 1. Принципиальная схема электротракторного агрегата.

Т — токосъем, ЗП-10 — Защитный промежуток на 10 кв, ПКТ-10 и ПК — предохранители на 10 кв, ТН — Трансформатор напряжения 6/0,1 кв, ЗП-1(1) — защитный промежуток на 1,0 кв, ЗП-1(2) — защитный промежуток на 0,1 кв, ТС — Трансформатор силовой 10/1,0 кв 75 ÷ 100 квд, ПК — Пакотный кабель, ТБ — токосъем бабара, ТД — тракторный двигатель, $R_{зт}$ — сопротивление заземления трактора.

ны сперва сработать главные защитные промежутки ЗП-6—10, в результате чего возникает короткое замыкание в цепи 10 кВ, и, следовательно, отключение полевой линии на питающей подстанции.



Фиг. 2. Защитный промежуток ЗП-1; а — разрез; б — общий вид.

Выбор конструкции защитного промежутка

Защитный промежуток должен удовлетворить следующим требованиям:

1. Напряжение срабатывания защитного промежутка должно быть выше уровня коммутационных перенапряжений, т. е. $U_{нр} > 4 \cdot U_{ф} = 2540$ вольт (принимая кратность коммутационных перенапряжений — 4,0) и ниже уровня изоляционной прочности аппаратов 1,0 кВ.

2. Вольтсекундная характеристика защитного промежутка должна быть пологая до предразрядных времен 1—2 мксек.

3. Напряжение срабатывания промежутка должно быть стабильным.

4. Защитный промежуток должен быть многократного действия.

5. Защитный промежуток должен пропускать токи однофазного замыкания на землю сети 6—10 кВ без заметного изменения защитных характеристик.

6. Не допускается окисления электродов защитного промежутка.

Защитный промежуток ЗП-1 (фиг. 2а) состоит из двух рабочих электродов 1 с закругленными краями, внутренние поверхности которых образуют защитный воздушный промежуток d , а в наружные части ввинчены рабочие зажимы 4. Один из рабочих электродов окольцован шайбой из миканитовой пластины 2. Рабочие электроды запрессованы в корболетовые крышки 3.

Конструкция ЗП-1 разработана совместно с работниками Ереванского электромашиностроительного завода. Главным параметром

защитного промежутка является величина междуэлектродного расстояния d .

Первому требованию удовлетворяет воздушный промежуток с соответствующим междуэлектродным расстоянием d .

Удовлетворение второму, третьему и четвертому требованиям достигается путем подбора соответствующей конструкции, создающей равномерное поле.

Удовлетворение пятого требования достигается подбором соответствующего материала электродов.

Шестому требованию удовлетворяет закрытая герметичная конструкция.

Электрическое поле промежутка

Условие пробоя воздушного промежутка определяется [1] уравнением

$$\gamma \left(e^{\int_0^d \alpha dx} - 1 \right) = \mu \quad (1)$$

где: γ — коэффициент поверхностей ионизации,
 α — первый коэффициент объемной ионизации,
 μ — ионизационное нарастание, равное единице (режим стационарного разряда),
 d — междуэлектродное расстояние в см.

Основная задача конструирования защитного промежутка заключается в проектировании электродов применительно к заданному характеру поля.

В силу того, что электроды являются телом вращения, можно ограничиться расчетом кривой, которая получается от пересечения рабочей поверхности электрода с перпендикулярной к ней поверхностью, проходящей через центр тела вращения.

Для расчета пользуемся формулами преобразования Шварца [2].

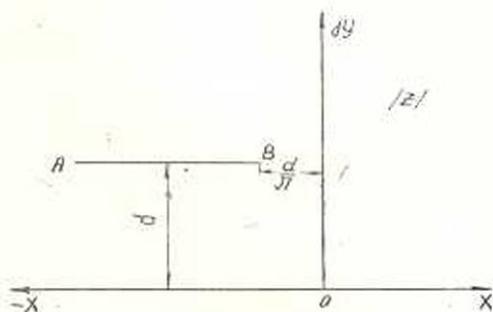
При построении электрического поля одна из обкладок бесконечной протяженности совпадает с осью $X-X$ (фиг. 3), а другая обкладка имеет конечную длину.

На плоскости z координаты x и y произвольной точки имеют следующую связь:

$$\begin{aligned} x &= A (e^{\tau} \cos \theta + \varphi) \\ y &= A (e^{\tau} \sin \theta + \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

где $A = \frac{d}{\pi}$ — расстояние от края проводящей полуплоскости до мнимой оси,

$$\varphi = \ln \frac{r}{r_0}, \quad r — \text{радиус}$$



Фиг. 3. Сечение плоского конденсатора плоскостью комплексного переменного.

вектора в полярных координатах, r_0 — первоначальное значение радиуса вектора $r_0 = -1$,

θ — аргумент $x(\theta, \varphi)$ и $y(\theta, \varphi)$.

Построение электрического поля проводится для $\theta = 0; 0,2\pi; 0,4\pi; 0,6\pi; 0,8\pi$ и $\varphi = 0; -0,5; -1,0; -1,5; -2$.

Известно, что если функцию $f(z) = u + jv$ приравнять к постоянным величинам $U = u(x, y) = \text{const} = \varphi_1; \varphi_2; \varphi_3$, а $V = v(x, y) = \text{const} = \theta_1; \theta_2; \theta_3$, то на плоскости Z получится ряд ортогональных линий, $v(x, y) = \theta_1; \theta_2; \theta_3 = \text{const}$ — определяет уравнение следов эквипотенциальных поверхностей на плоскости Z .

$u(x, y) = \varphi_1; \varphi_2; \varphi_3 = \text{const}$ — уравнение силовых линий поля на плоскости Z .

На основании теоретических и экспериментальных данных оптимальное междуэлектродное расстояние промежутка $d = 0,9$ мм.

С помощью вышеприведенных уравнений определяем форму рабочих электродов, обеспечивающих сравнительно равномерное поле, стабильное напряжение срабатывания и многократность действия. Это достигается тем, что один из них выбирается совпадающим с эквипотенциальной поверхностью $\theta = 0,5\pi$ (фиг. 4). При $\theta = 0,5\pi$ кривая противоположного электрода является симметричным изображением первого. Поэтому коэффициент преобразования междуэлектродного расстояния равняется единице.

Как видно из фиг. 4, поверхность рабочих электродов практически совпадает с линией равного потенциала $\theta = 0,5\pi$.

Одним из главных показателей защитных промежутков является вольтсекундная характеристика, которая характеризует защитные свойства промежутка при разных предразрядных временах. Защитный промежуток закрытого типа изолирован от действия радиоактивных излучений земной коры, следовательно начальная ионизация будет ослаблена.

В силу «прилипания» свободного электрода к молекуле, из-за столкновения с ними и т. д. время появления первого эффективного электрона будет различное в зависимости от напряженности поля.

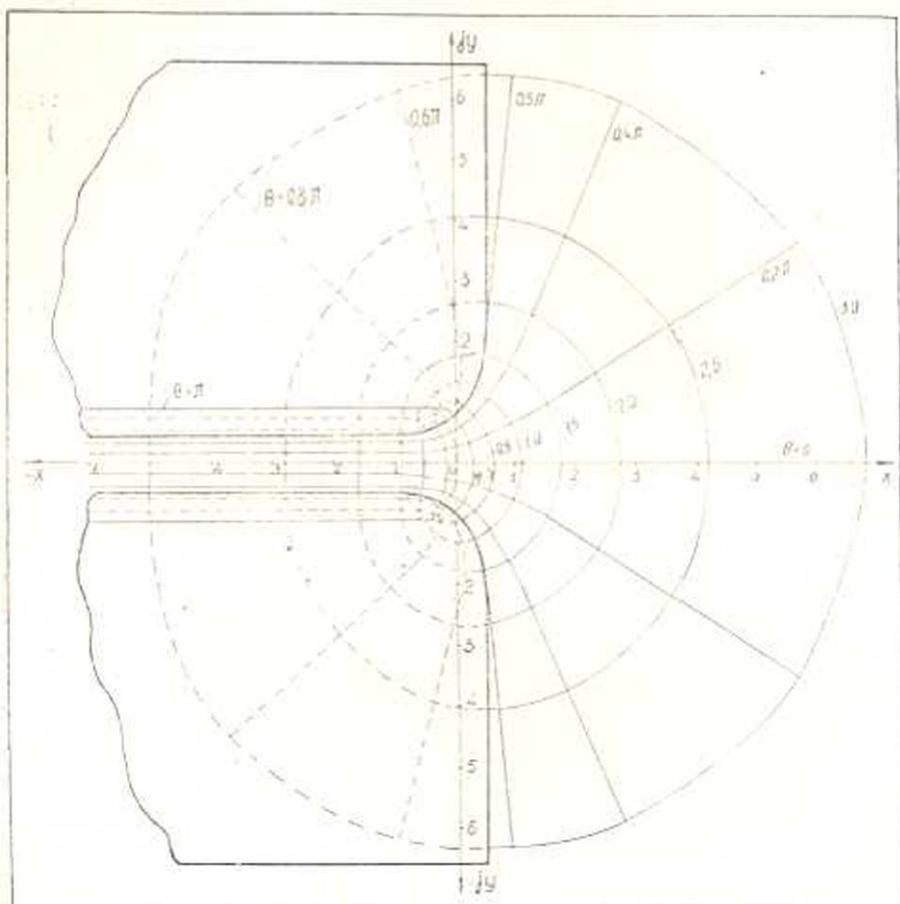
Защитные промежутки закрытого типа без подсвечивания или освещения имеют большие разбросы по величине пробивного напряжения и предразрядного времени, а коэффициент импульса подымается уже при $t_d = 2-3$ мксек до $2,3-2,8$ [4].

В защитном промежутке с малым разрядным расстоянием ($d = 0,9$ мм) время разряда сводится только к времени статического запаздывания. При уменьшении статического времени запаздывания до $t_d = 2-3$ мксек напряженность, при которой формируется канал разрядов, резко возрастает.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, статическое время запаздывания в сильной степени зависит от интенсивности освещения поверхности катода и материала электро-

да [3]. С увеличением освещения катода увеличивается количество эффективных электродов в единицу времени.

Подсвечивание защитного промежутка ЗП-1 осуществляется при помощи миканитовой шайбы, окаймляющей рабочий электрод.



Фиг. 4. Электрическое поле между двумя полуплоскостями с наложенными на него поверхностями электродов ЗП-1.

Как известно, на поверхности раздела двух диэлектриков (фиг. 5) отношение тангенсов преломления векторов напряженности поля прямо пропорционально диэлектрическим проницаемостям

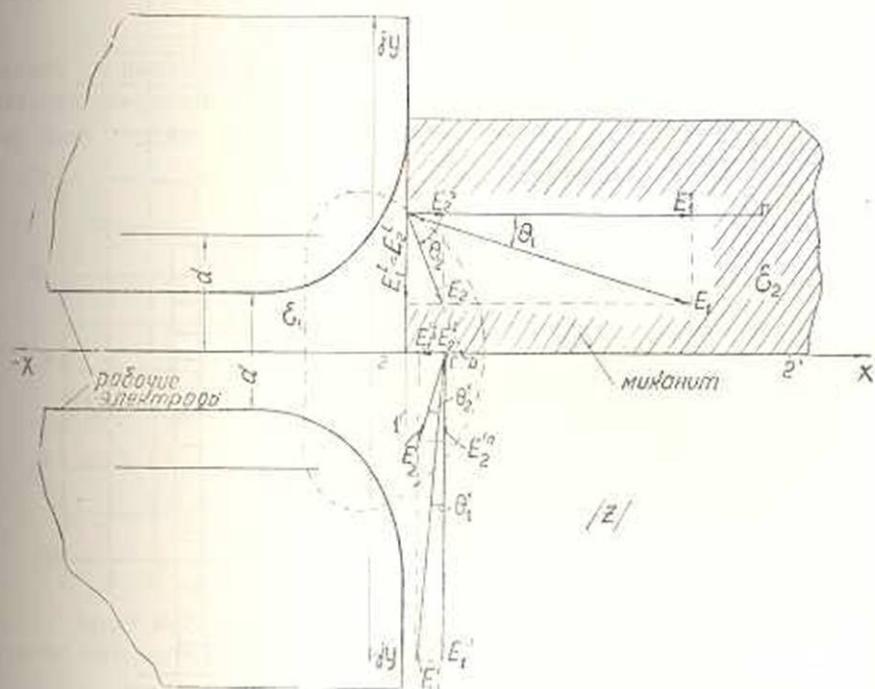
$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2},$$

а векторы напряженности поля обратно пропорциональны этим величинам

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

На краях рабочих электродов линии электрического поля — кривые, поэтому E_z на поверхности $22'$ и миканите будет где-то в точке

„Г“ вместо точки „D“, а в той же точке в воздухе — E_1' . На фиг. 5 показано изменение вектора напряженности как по величине, так и по углу.



Фиг. 5. Влияние миканитовой шайбы на векторы напряженности электрического поля ЗП-1.

Как видно из фиг. 5, между миканитовой шайбой и рабочим электродом, где они соприкасаются, получается сгущение линий электрического поля, и, следовательно, большие напряженности поля.

Принимая во внимание, что шайба собрана из тонких слоев миканита, можно сказать, что между этими слоями получаются большие напряженности поля (на фиг. 5 это не показано). При этом на поверхности миканита получается светящаяся полоска поверхностной короны. При увеличении напряжения светящаяся полоска увеличивается и преобразуется в местные разряды. Излучение этих разрядов подсвечивает междуэлектродное пространство. Таким образом, уменьшение начальной ионизации в закрытом промежутке при импульсных напряжениях компенсируется подсвечиванием промежутка с помощью миканитовой шайбы.

Уменьшение начальной ионизации при переменном токе компенсируется длительностью приложения напряжения.

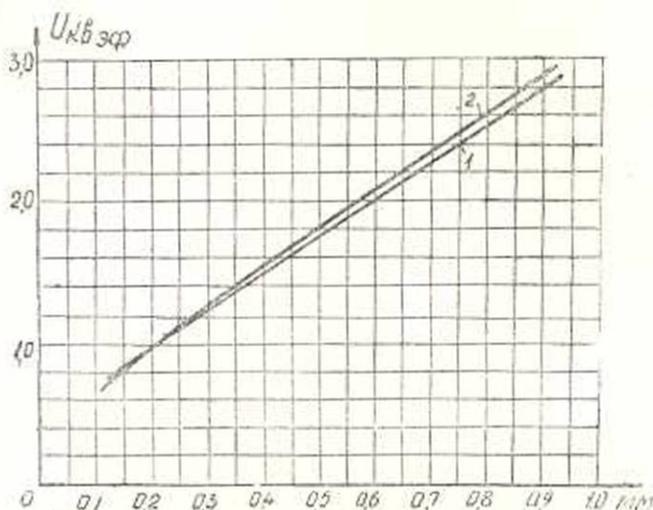
Экспериментальное исследование

Для исследования промежутка ЗП-1 были изготовлены 1 комплект макетного образца с латунными электродами в гетинаксовых изо-

дирующих крышках и 12 комплектов промышленных образцов с электродами, изготовленными из различных материалов: латуни без покрытия, латуни с покрытием из олова, хрома, стали с покрытием из цинка, никеля и меди без покрытия.

Были проведены следующие эксперименты:

1. *Определение зависимости пробивного напряжения от междуэлектродного расстояния d .* Как видно из фиг. 6, экспериментальная кривая 2 совпадает с расчетной кривой 1; разница между ними составляет максимум $3,2\%$.



Фиг. 6. Зависимость пробивного напряжения от междуэлектродного расстояния.

Фиг. 7 показывает, насколько влияет качество обработки поверхности электродов при повторных пробоях (n) на электрическую прочность промежутка. Кривая 2 соответствует шлифованной поверхности, а кривая 1 — нешлифованной.

Кривая 1 имеет разброс по пробивному напряжению ± 400 в, а кривая 2 ± 30 в.

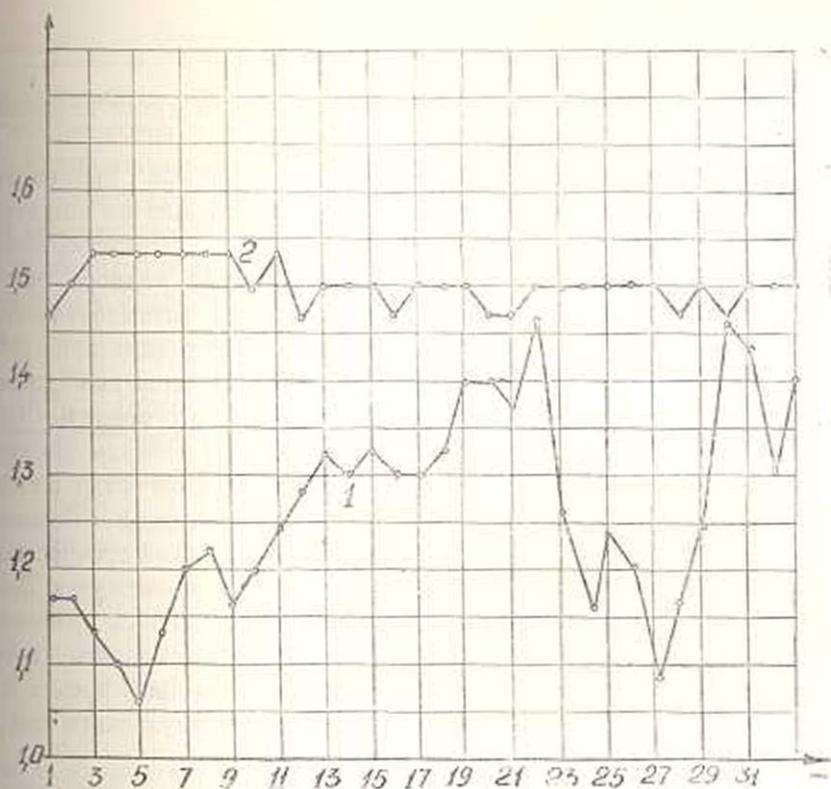
2. *Вольтсекундная характеристика.* Для снятия вольтсекундной характеристики промежутка применялся импульсный генератор напряжения с емкостью в ударе $0,05$ мкф. Демпферные и разрядные сопротивления выбраны из условий получения стандартной волны ($1,5/40$ мксек).

Были сняты 100 осциллограмм разрядов при разных предразрядных временах и величинах амплитуды напряжения при наличии подсвечивания промежутка.

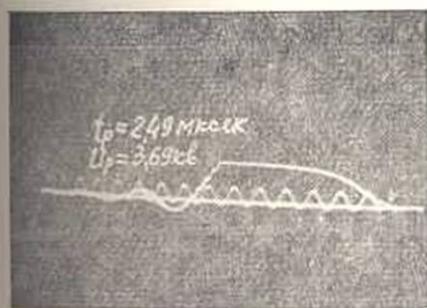
На фиг. 8, а, б, в, показаны осциллограммы среза волны на промежутке при разных предразрядных временах.

На фиг. 9 показаны вольтсекундные характеристики промежутка, при относительной плотности воздуха $\delta = 0,9$.

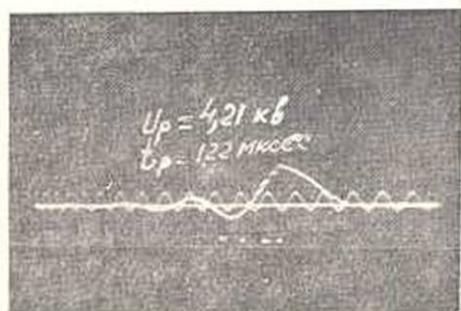
На фиг. 10 показана зависимость коэффициента импульса от предразрядного времени $K_I = f(t_d)$ с подсвечиванием и без подсвечивания.



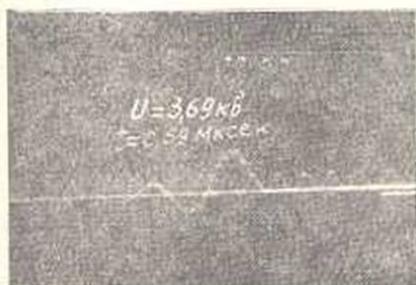
Фиг. 7. Разброс пробного напряжения от состояния поверхности рабочих электродов: 1—необработанная поверхность, 2—обработанная поверхность.



а



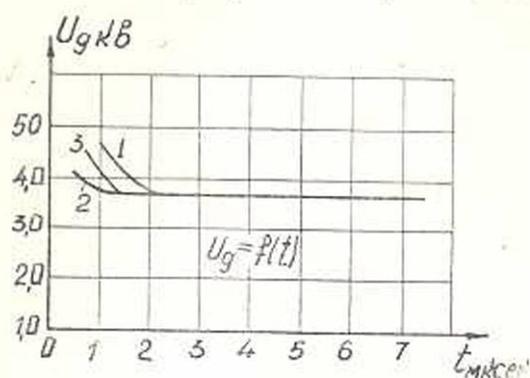
б



Фиг. 8. Осциллограммы среза волны на промежутке при разных предзарядных временах.

Тут же приведена характеристика единичного промежутка вилтовых разрядников ВЭИ (кривая — 3).

3. *Испытание импульсными токами.* Защитный промежуток ЗП-1 может пропускать импульсные токи, возникающие во вторичной обмотке трансформатора вследствие подпора напряжения на заземленном корпусе подстанции при срабатывании защитных промежутков на стороне 6—10 кВ.



Фиг. 9. Вольтсекундная характеристика промежутка ЗП-1.

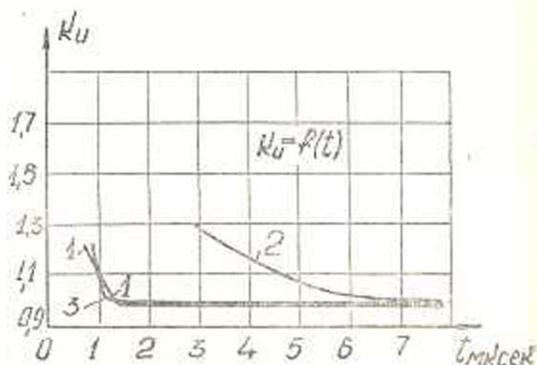
1—верхняя огибающая, 2—нижняя огибающая, 3—средняя характеристика.

На промежуток подавалась импульсная короткая волна длиной $t_b = 2,65 \text{ мксек}$, ток $I = 10 \text{ ка}$. Испытания показали, что при длине междуэлектродного расстояния порядка 0,3—1 мм и при импульсных токах 10 ка изменение пробивного напряжения после прохождения 100 последовательных импульсов, для промежутков с медными и латунными электродами, не превосходит 25%, а для промежутков с электродами из оцинкованной и хромированной стали — 5%.

4. *Испытание током замыкания на землю.* При повреждении изоляции между первичной и вторичной обмоткой силового трансформатора изоляция вторичной обмотки 1,0 кВ принимает потенциал поврежденной точки обмотки 6 кВ. Если при этом срабатывает ЗП-1, то через него течет ток замыкания на землю высоковольтной сети 6—10 кВ.

Нарушения изоляции могут иметь временный характер, как например, пробой масла и выводных концов обмотки, минуя твердую изоляцию обмоток, случайные закорачивания между втулками и т. д. При этом после срабатывания промежутка ток, проходящий через него, не дол-

обмотке трансформатора вследствие подпора напряжения на заземленном корпусе подстанции при срабатывании защитных промежутков на стороне 6—10 кВ. При этом поверхность электродов может разрушиться, что приведет к изменению электрической прочности защитного промежутка. Электроды защитных промежутков испытывались путем присоединения промежутка к цепи импульсного генератора тока.

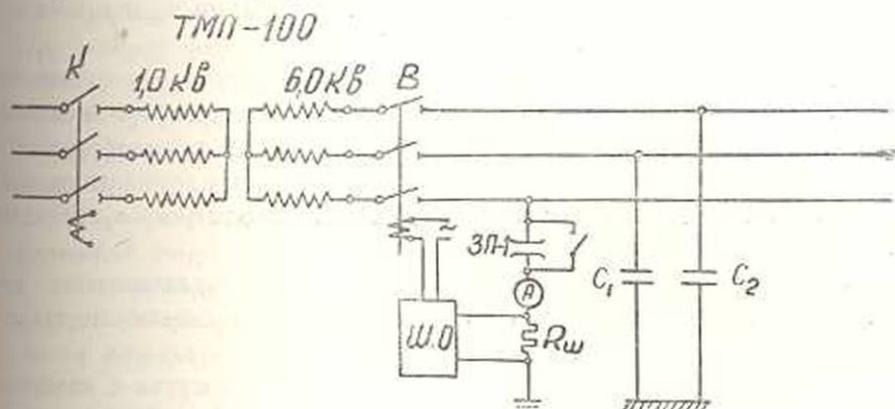


Фиг. 10. Зависимость коэффициента импульса от предразрядного времени.

1—с подсвечиванием, 2—без подсвечивания, 3—характеристика единичного промежутка вилтовых разрядников ВЭИ.

жен повреждать поверхность электродов промежутка, чтобы промежуток был готов к действию в последующем.

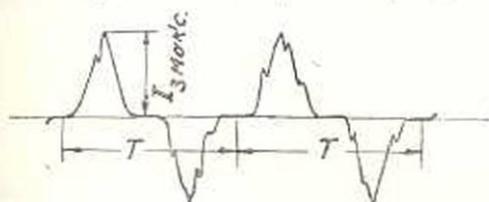
Схема испытания после замены линии соответствующими емкостями примет довольно простой вид (фиг. 11). Изменением емкостей конденсаторов регулировалась величина тока замыкания на землю через ЗП-1. Измерение этого тока производилось амперметром и шлейфовым осциллографом.



Фиг. 11. Схема испытания промежутка током однофазного замыкания на землю.

Величины испытательных токов $I = 2,25 \div 6,75a$ соответствовали длине сети 6 кв — $150 \div 450$ км и для сетей 10 кв — $90 \div 270$ км. Проведение таких токов через ЗП-1 не привело к изменению пробивной прочности промежутка.

Осциллограмма тока замыкания на землю через ЗП-1 показана на фиг. 12. Из осциллограммы видно, что ток проходит через про-



Фиг. 12. Осциллограмма тока замыкания на землю.

межуток не в течение всего полупериода. При изменении знака тока происходил обрыв дуги, и дуга снова восстанавливалась в следующем полупериоде.

В ы в о д ы

1. Существующие защитные аппараты не могут служить для защиты от перенапряжений изоляции в цепи 1,0 кв передвижной подстанции.

2. В результате исследования малых разрядных расстояний создан защитный промежуток на номинальное напряжение 1140 в со стабильным напряжением срабатывания.

3. Разработанная конструкция защитного промежутка для передвижной подстанции удовлетворяет требованиям защиты изоляции вторичной обмотки силового трансформатора и цепи 1,0 кВ электроотракторного агрегата при появлении на них перенапряжений.

4. Рабочие электроды с закругленными краями изготавливаются из хромированной стали.

5. Установлено номинальное междуэлектродное расстояние защитного промежутка $d = 0,9 \pm 0,05$ мм для предельного пробивного напряжения $U_{пр} = 2630$ в_{эф} при наблюдаемом максимальном разбросе 100 в.

6. Средние пробивные напряжения защитных промежутков, приведенные к стандартным условиям, должны находиться в пределах 2,7—3,0 кВ_{эф}.

7. Для получения пологой вольтсекундной характеристики при предразрядных временах $t_d = 1-2$ мксек, в промежутке осуществляется подсвечивание микитановой шайбой.

8. Напряжение срабатывания защитного промежутка с подсвечиванием электродов при промышленной частоте $U_{пр} = 2680$ в_{эф} минимальное импульсное напряжение — 3690 в, а при предразрядном времени $t_d = 1,0$ мксек — $U = 4100$ в.

9. Коэффициент импульса при $t_d = 1,0$ мксек равен 1,08.

10. Защитный промежуток ЗП-1 может служить защитным аппаратом в цепях с номинальным напряжением 380 в переменного тока в линиях связи, где сопровождающие токи не превышают величину, которую выдерживает защитный промежуток.

11. Для большей безопасности защитный промежуток устанавливается на трех фазах.

Лаборатория электротехники
АН Армянской ССР

Поступило 23 XI 1955

Մ. Մ. Կարապետյան, Ա. Ս. Թորոսյան

ԷԼԵԿՏՐԱՏՐԱԿՏՈՐԱՅԻՆ ԱԳՐԵԳԱՏԻ ՇՐՋԻԿ ԵՆթԱԿԱՅԱՆԻ 1000 ՎՈՒՏԻ ՇՂԹԱՅԻ ՊԱՇՏՊԱՆԻԶ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ ՅՈՒ-1

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

ՇՐՋԻԿ ԵՆթԱԿԱՅԱՆԸ 10—6/1,0 կիրառվող լարումով ծառայում է էլեկտրատրակտորի սնման համար:

Ենթակայանի 1000 վոլտի շղթայի մեկուսացումը հնարավոր գերլարումներին պաշտպանելու նպատակով նրա երեք ֆազերի համար մշակված է բազմապատիկ գործողություն պաշտպանիչ տարածություն ունեցող մեկուսացումով, որն իր միջով կարճ փակում է 1000 վոլտի շղթան, երբ պատկանցիվների տարբերությունը բարձր է նորմավորված մեծություններից:

Մշակված պաշտպանիչ տարածության կոնստրուկցիան բավարարում է այն պահանջներին, որոնք առաջադրվում են պաշտպանիչ սարքավորումներին՝ մեկուսացումը դերլարումներից պաշտպանելու դեպքում:

Հետազոտական աշխատանքներից հետո պաշտպանիչ տարածության համար քնտրվել է միջէլեկտրոդային տարածության՝ $d = 0,9 \pm 0,05$ մմ, որին համապատասխանում է փոփոխական հոսանքի ծակման լարում՝ $U_{էֆ} = 3680$ վոլտ, իսկ իմպուլսային ծակման մինիմալ լարումը 3690 վոլտ:

Որպեսզի պաշտպանիչ տարածության վոլտավայրկյանային բնութագիրը ստացվի փոքր թեքությամբ՝ $i = 1-2$ մկվրկ մինչպարպման ժամանակամիջոցներում, պաշտպանիչ տարածությունում հարմարեցված է մեկանիտի օդակ: Այդ դեպքում պաշտպանիչ տարածության իմպուլսային դորձակիցը չի անցնում $k \leq 1,084$, $t = 1,0$ մկվրկ մինչպարպման ժամանակի դեպքում:

Պաշտպանիչ տարածության էլեկտրոդներն ունեն համապատասխան կլորացված ծայրեր, որոնք վերացնում են ծայրային էֆեկտը:

Պաշտպանիչ տարածությունն իր միջով անց է կացնում բոլոր հնարավոր հոսանքները, որոնք կարող են առաջ գալ 1000 վոլտի շղթայում, առանց փոփոխելու էլեկտրական բնութագրերը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. Гостехиздат, 1947.
2. Круг К. А. Основы электротехники. Том 1, Госэнергоиздат, 1946.
3. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Том 1, Госэнергоиздат, 1940.
4. Monahan T. F. The Design and Performance of surge divertors for the Protection of alternating current systems. The Proceedings of the Inst. of El. Eng. 1951, p. II, vol. 98, № 63.