

Б. С. ЭНЕНШТЕЙН

МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗЕМЛЕ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 30 X 1947)

§ 1. В течение 1946—47 гг. автором этой статьи разрабатывался метод для изучения становления электрического поля в земле. Согласно теории метода, разработанной чл.-корр. АН СССР А. Н. Тихоновым (1), получается, что если включить в заземленный с обоих концов провод импульс тока, устанавливающийся в нем мгновенно и, следовательно, имеющий прямоугольную форму, то электрическое поле, созданное в земле этим импульсом, устанавливается в течение конечного промежутка времени. Длительность времени установления поля зависит от среднего удельного сопротивления земли и расстояния между точкой возбуждения поля и точкой наблюдения, т. е. между центрами питающего и приемного диполей. В простейшем случае однородной и изотропной земли эта зависимость выражается следующим соотноше-

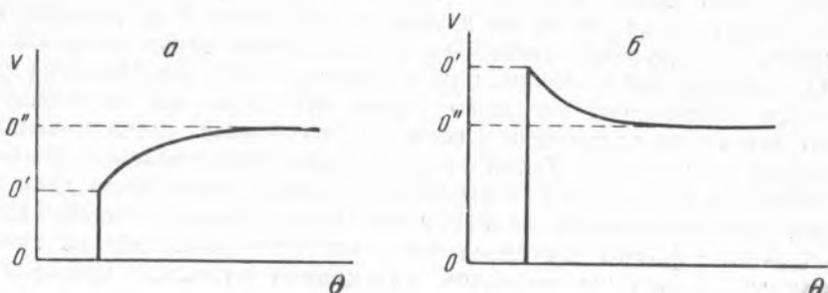


Рис. 1. а — случай, когда оси диполей расположены по одной прямой, $OO' = \frac{1}{2} OO''$; б — случай, когда оси диполей параллельны, $OO' = \frac{2}{3} OO''$

нием: $\tau = 0,314x^2/\rho$, где τ — характерное время становления электрического поля в секундах, x — расстояние между центрами питающего и приемного диполей в км, ρ — удельное сопротивление земли в $\Omega/\text{м}$.

Характер кривых становления поля изображен на рис. 1, где на оси абсцисс отложено время в единицах τ , а на оси ординат — разность потенциалов.

§ 2. Для полного соответствия между практическим осуществлением метода и требованиями теории необходимо удовлетворить прежде всего следующим двум условиям: 1) включающийся в землю единичный импульс тока должен быть прямоугольным и 2) регистрация приемного импульса должна производиться без заметных искажений.

Эти два условия сводятся к тому, что процессы установления как в питающей установке, так и в приемной должны происходить гораздо быстрее, чем подлежащие исследованию процессы установления в земле.

Так как интерес могут уже представлять исследования при расстояниях между центрами питающего и приемного диполей порядка 100 м, а встречающиеся обычно удельные сопротивления верхних слоев земли порядка $100 \text{ } \Omega/\text{м}$, то характерное время (τ) в этом достаточно крайнем случае будет порядка $3 \cdot 10^{-5}$ сек. и полное время становления приемного импульса — порядка $3 \cdot 10^{-4}$ сек. Следовательно, время нарастания импульса тока в проводе питающего диполя должно быть не более 10^{-5} сек. Такое время нарастания тока может быть легко обеспечено с помощью тиратрона, время зажигания которого, как известно, порядка 10^{-7} сек. Поэтому вполне удобный и отвечающий

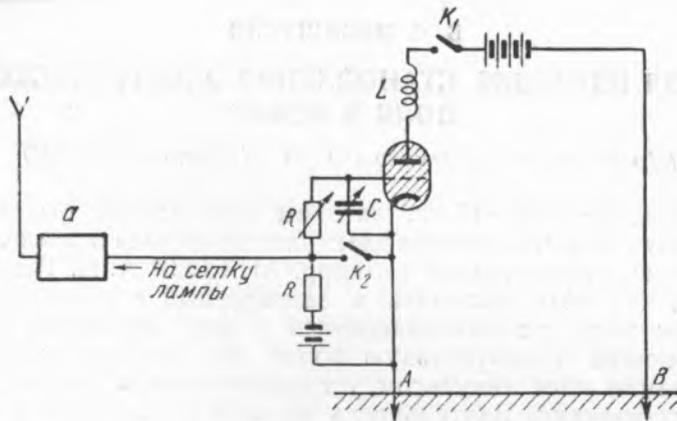


Рис. 2. *a* — коротковолновый передатчик

требованиям теории способ пропускания в землю прямоугольного импульса тока может быть осуществлен по схеме, представленной на рис. 2. Здесь к одному из питающих электродов *A* подключен катод тиратрона, а к другому электроду *B* подключен минус анодной батареи. Отрицательный потенциал на сетке тиратрона подбирается таким, чтобы при включении анодного ключа K_1 тиратрон не зажегся. Только лишь при включении ключа K_2 потенциал сетки повышается и тиратрон зажегся. Такой способ обеспечивает плавное зажигание тиратрона без экстратоков замыкания и кривая нарастания тока в питающем диполе является практически строго прямоугольной. Некоторое искажение формы импульса тока может происходить за счет индуктивности и емкости проводов питающего диполя. Однако путем расчета и экспериментальной проверки нетрудно установить, что это искажение несущественно и может привести к растягиванию питающего импульса в проводе с 10^{-7} до 10^{-6} сек.

§ 3. Разность потенциалов на приемных электродах от тока питающего диполя обычно очень мала, поэтому ее приходится усиливать (рис. 3). С другой стороны, для наглядного воспроизведения формы кривой становления электрического поля, т. е. кривой изменения разности потенциалов на приемных электродах, с целью дальнейшей обработки лучше всего получить ее на экране трубки катодного осциллографа и зафотографировать. Поэтому выход усилителя подан на вертикальные пластины осциллографа, а с помощью фотоприставки изображение фотографируется.

Чтобы в достаточной степени развернуть приходящий сигнал на экране трубки, необходимо осуществить однотактную горизонтальную развертку. Горизонтальная развертка должна начинаться несколько раньше прихода сигнала по земле к приемным электродам. В противном случае не будет уверенности в том, что приемный импульс полностью разворачивается на экране трубки. Осуществление подобной

горизонтальной развертки оказалось наиболее целесообразным произвести следующим образом. С тиратроном питающего диполя связывается коротковолновый передатчик по схеме, представленной на рис. 2. При разомкнутом ключе K_2 потенциал сетки тиратрона имеет большое отрицательное значение и тиратрон заперт. Точно так же из-за большого отрицательного потенциала сетки заперта и лампа передатчика. При включении ключа K_2 потенциалы сеток тиратрона и лампы передатчика одновременно повышаются и тиратрон и передатчик одновременно срабатывают.

Рядом с катодным осциллографом на приемной станции помещается коротковолновый приемник, принимающий и усиливающий сигнал от передатчика (рис. 3). Усиленный сигнал отпирает развертывающий тиратрон, подключенный к выходу приемника (ждушая развертка).

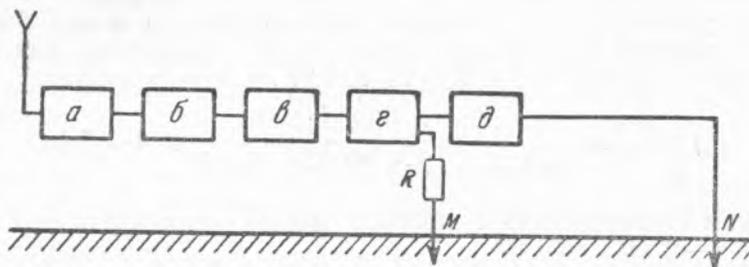


Рис. 3. а — приемник, б — ждущая развертка, в — осциллограф, г — усилитель, д — фильтр

В анодной цепи развертывающего тиратрона включен ряд параллельных аperiодических контуров, емкости которых подключены к горизонтальным пластинам трубки осциллографа. Временные постоянные этих контуров подобраны таким образом, чтобы получить необходимой продолжительности горизонтальные развертки. Оказывается, однако, что при такой методике воздушный сигнал несколько запаздывает по сравнению с земным сигналом и горизонтальная развертка начинается с некоторым опозданием по сравнению с приходом земного сигнала. Это происходит главным образом оттого, что для раскачки лампы передатчика требуется некоторое время, точно так же проходит некоторая доля секунды пока сетка развертывающего тиратрона достигнет потенциала зажигания, тогда как зажигание питающего тиратрона начинается одновременно с замыканием ключа K_2 . Устранение этого запаздывания достигается включением аperiодического контура в цепь катод — сетка питающего тиратрона (рис. 2). В этом случае для передатчика и всего канала, осуществляющего горизонтальную развертку, все остается по-старому, тогда как зажигание питающего тиратрона происходит уже не одновременно с замыканием ключа K_2 , а спустя некоторую долю секунды, которая легко регулируется переменными сопротивлением и емкостью аperiодического контура.

§ 4. Следует еще остановиться на двух особенностях, имеющих для нашего метода весьма важное значение.

Первая из них состоит в том, что на приемные электроды попадают сигналы от передающих радиостанций. В условиях Московской обл. благодаря близости ряда мощных станций эти сигналы настолько велики, что после прохождения через усилитель они перекрывают весь экран трубки и оказываются по величине в несколько раз больше приемного сигнала. Решающими помехами в этом отношении являются передачи от длинноволновых радиостанций, несущая частота которых находится в пределе 150—300 kHz, передачи же от коротковолновых

радиостанций не являются для нас помехами, поскольку несущая частота их больше 1 МГц и не пропускается усилителем.

Чтобы освободиться от помех длинноволновых радиостанций, понадобилось включить последовательно в приемный диполь непосредственно у входа усилителя фильтр с острой настройкой, величины L и C которого были подобраны непосредственно в полевых условиях (рис. 3). Этот фильтр, настроенный в резонанс с несущей частотой передающих длинноволновых радиостанций, не пропускал именно эти частоты, тогда как все остальные частоты требуемого диапазона практически пропускались без искажений.

Вторая особенность состоит в том, что в момент зажигания питающего тиратрона и возникновения мощного импульса тока в питающем диполе возникают собственные электрические колебания в проводе, соединяющем электроды A и B . Частота этих колебаний зависит от величины самоиндукции и емкости этого провода и может быть примерно подсчитана для провода любой длины. Например, для провода длиной 100 м, $L=10^{-4}$ Н и $C=15 \cdot 10^{-10}$ Ф. Следовательно,

$$f = \frac{1}{T} \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^{-10}}} \cong 4 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

(омическим сопротивлением провода можно пренебречь, так как оно не более 1—2 Ω).

Таким образом, причина возникновения собственных колебаний в проводе состоит в том, что период этих колебаний ($2,5 \cdot 10^{-6}$ сек.) оказывается больше времени нарастания импульса тока (10^{-6} сек.) и последний является для провода толчком, вызывающим в нем собственные колебания.

Эти колебания наводят в поверхностном слое токи, создающие на приемных электродах разности потенциалов, изменяющиеся с частотой $4 \cdot 10^5$ Hz. Так как время прихода этих колебаний совпадает со временем прихода земного импульса, то начальная часть кривой становления неизбежно оказывается размазанной и форма этой части кривой, имеющей важное значение, оказывается сильно искаженной.

Весьма простым и удобным выходом из этого положения служит включение некоторой самоиндукции в питающий провод (лучше всего непосредственно у анода тиратрона). Благодаря этой самоиндукции время нарастания тока в проводе удлиняется до такой величины, когда этот импульс уже не будет являться для провода толчком. Величина самоиндукции оказалась в нашем случае равной около 10^{-4} Н. Такая добавочная самоиндукция в питающем диполе может удлинить время нарастания тока в проводе до $3 \cdot 10^{-6}$ сек., что не нарушает требования прямоугольности формы импульса тока.

С помощью изложенного метода нами получены кривые становления поля в земле, вполне согласующиеся с данными теории как в качественном, так и количественном отношениях. В настоящей статье мы ограничиваемся кратким изложением только самого метода, тогда как способ обработки полученных результатов и их количественная интерпретация будут изложены нами в следующей статье.

Геофизический институт
Академии Наук СССР

Поступило
30 X 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Тихонов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 10, № 3 (1946).