

ЛАБОРАТОРНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Л. В. Мысовский, Ленинград

РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО ПОТЕНЦИАЛА

В последнее время технические трансформаторы на напряжение до одного миллиона вольт и больше уже не являются особенной редкостью. Такие трансформаторы имеются не только за-границей, но и у нас в СССР. Нужно сказать, однако, что эти трансформаторы слишком громоздки, требуют для своего питания большого количества энергии и поэтому почти не могут быть использованы при тонких лабораторных работах. Для большинства научных и научно-технических работ с высоким потенциалом вовсе не нужно большой мощности. Наоборот, громадные искры, испускаемые мощными трансформаторами, не позволяя даже поднести к ним физические приборы и роль этих трансформаторов в технике ограничивается главным образом испытанием изоляторов. Кроме величины и мощности искр, немалой помехой в лабораторной работе служат и самые размеры технических трансформаторов. Для высоковольтных установок приходится отводить особые залы, во много раз превосходящие размерами обычные комнаты для научных работ. Часто такие установки помещаются даже в отдельных, специально приспособленных зданиях.

Между тем, в природе мы имеем примеры — ядра атомов,—когда потенциалы в несколько миллионов вольт сосредоточены в чрезвычайно малом объеме. Неудивительно поэтому, что физики стремились различными способами по-

лучить высокое напряжение от небольшого и маломощного источника. Построить обычный трансформатор с коэффициентом связи, близким к единице, небольших размеров, но дающий высокое напряжение, не представляется возможным, ибо отдельные витки трансформатора должны быть очень хорошо изолированы друг от друга и от корпуса трансформатора для того, чтобы напряжение в один, два миллиона вольт не вызывало разряда внутри самого трансформатора.

Этого затруднения пытались избежать или, по крайней мере, уменьшить его, путем последовательного (каскадного) соединения нескольких отдельных трансформаторов. Но даже и при каскадном соединении размеры высоковольтной установки продолжают оставаться грандиозными. Кроме того высокие напряжения на выводах трансформатора при разрядах вызывают настолько сильные токи даже во вторичной обмотке трансформатора, что мощность, подаваемая в первичную обмотку, должна быть очень значительной. По этой причине приходится брать для первичной обмотки проволоку большего сечения. Все это вместе взятое заставило физиков искать других путей для получения высоких потенциалов. Цель этих исканий — создать маломощный источник потенциала в несколько миллионов вольт и затем применить его для искусственного расщепления элементов. Конечно, получение потенциала в несколько миллионов вольт представляет интерес и с других точек зрения. Получение только градиента потенциала в миллион вольт уже позволило наблюдать Милликэну так называемое холодное испускание электронов металлами. Несомненно, что высокий потенциал, когда им удастся овладеть, позволит сделать целый ряд интересных наблюдений в самых различных областях физики.

Какие же пути намечаются в настоящее время для получения высокого потенциала, пригодного для лабораторных целей? Одним из таких путей является переключение конденсаторов с параллельного на последовательное. Практического применения этот способ в чистом виде не получил, хотя им и удавалось достигать напряжений до одного миллиона вольт. Лишь в комбинации с трансформаторами

и кенотронами этот метод позволяет увеличивать предельное напряжение трансформатора в два-три раза. Как пример такого устройства, получившего большое распространение на практике, можно указать на стабиливольт фирмы Сименс и Гальске, в основу которого положена схема, предложенная впервые Грейнахером. Другой метод получения высокого потенциала, требующий сравнительно небольшой мощности, предложен был Тесла. Трансформатор Тесла настолько известен, что нет необходимости описывать его устройство. Долгое время этим трансформатором пользовались лишь, как эффективным прибором для демонстрации резонанса электрических колебаний высокой частоты. Длинные и мощные искры, которые можно было извлечь из вторичной катушки Тесла, давно обращали на себя внимание физиков и вызывали вопрос о том, какие потенциалы здесь возникают? Теорией Тесла-трансформатора занимался еще Друде, а затем и целый ряд других исследователей. Однако, полной теории этого трансформатора мы не имеем еще и до настоящего времени. Вопрос о величине потенциала также оставался открытым до самого последнего времени. Лишь недавно удалось экспериментальным путем определить величину этого потенциала и проверить, таким образом, некоторые теоретические выводы. В дальнейшем мы остановимся главным образом на изложении двух работ, касающихся трансформатора Тесла. Одна из этих работ была сделана в Государственном радиовом институте в Ленинграде аспирантом Физического отдела, инженер-электриком В. Н. Рукавишниковым. Другая работа была произведена в Институте Карнеги в Вашингтоне.¹ Хотя эта работа была полностью напечатана лишь в январе 1930 г., но о сущности этой работы и о тех потенциалах, которые удалось получить, было известно уже раньше из предварительного сообщения в „Nature“, опубликованного в 1928 г. Уже предварительное сообщение вызвало большой интерес в научных кругах и оно неоднократно цитировалось в научной литературе.

¹ G. Breit, M. A. Tuve and O. Dahl. Phys. Rev. 35, 51 (1930).

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА С ЗАТУХАЮЩИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Полная теория трансформатора Тесла, как это было уже указано выше, слишком сложна, и потому мы не будем на ней останавливаться. Что же касается элементарной теории, то обычно она излагается в предположении, что омическими сопротивлениями обоих контуров можно пренебречь, и потому эти сопротивления полагаются равными нулю. В действительности же омическое сопротивление очень сильно сказывается на работе Тесла-трансформатора. Здесь мы приведем вывод основных уравнений Тесла-трансформатора, взятый из работы: „Роль омического сопротивления в трансформаторе Тесла“ В. Н. Рукавишникова.

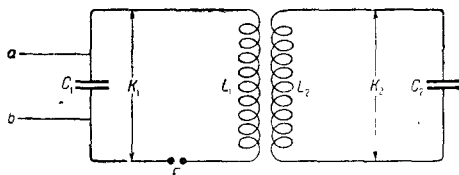


Рис. 1

Если нам даны два колебательных контура I и II, см. рис. 1, то, обойдя оба контура, на основании закона Кирхгофа получим:

$$\left. \begin{aligned} w_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= V_1 \\ w_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} &= V_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь w_1 и w_2 омические сопротивления контуров, i_1 и i_2 — силы токов, L_1 и L_2 — коэффициенты самоиндукции, M — коэффициент взаимной индукции и t — время. V_1 и V_2 — потенциалы на обкладках конденсаторов. Пользуясь равенством $i = C \frac{dV}{dt}$ преобразуем линейные уравнения (1) в систему линейных уравнений второго порядка относительно потенциалов. После указанного преобразования система эта будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} L_1 C_1 \frac{d^2 V_1}{dt^2} + w_1 C_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 + M C_2 \frac{d^2 V_2}{dt^2} &= 0 \\ L_2 C_2 \frac{d^2 V_2}{dt^2} + w_2 C_2 \frac{dV_2}{dt} + V_2 + M C_1 \frac{d^2 V_1}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для того чтобы найти и характеристическое уравнение для этой системы, подставим в нее частные решения вида

$$\begin{aligned} V_1 &= a_1 e^{\rho t} \\ V_2 &= a_2 e^{\rho t}. \end{aligned}$$

В результате подстановки получим:

$$\begin{aligned} L_1 C_1 a_1 \rho^2 e^{\rho t} + w_1 C_1 a_1 \rho e^{\rho t} + a_1 e^{\rho t} + M C_2 a_2 \rho^2 e^{\rho t} &= 0 \\ L_2 C_2 a_2 \rho^2 e^{\rho t} + w_2 C_2 a_2 \rho e^{\rho t} + a_2 e^{\rho t} + M C_1 a_1 \rho^2 e^{\rho t} &= 0. \end{aligned}$$

После преобразований и сокращения на $e^{\rho t}$ имеем:

$$\begin{aligned} a_1 (L_1 C_1 \rho^2 + w_1 C_1 \rho + 1) &= -a_2 M C_2 \rho^2 \\ a_1 M C_1 \rho^2 &= -a_2 (L_2 C_2 \rho^2 + w_2 C_2 \rho + 1). \end{aligned}$$

Разделив почленно эти уравнения одно на другое и написав равенство произведений крайних и средних членов, получим характеристическое уравнение в таком симметричном виде:

$$(L_1 C_1 \rho^2 + w_1 C_1 \rho + 1)(L_2 C_2 \rho^2 + w_2 C_2 \rho + 1) - M^2 C_1 C_2 \rho^4 = 0 \quad (3).$$

Это уравнение четвертой степени относительно ρ и общее решение могло бы привести к полной теории Тесла-трансформатора. Мы не будем этого делать здесь по двум причинам. Во-первых -- в результате общего решения уравнения четвертой степени мы пришли бы к слишком сложным выражениям, которые трудно было бы исследовать и потому трудно было бы выяснить роль отдельных факторов L , C , M и w на работу трансформатора Тесла. Во-вторых -- нас здесь интересует не общий случай работы Тесла-трансформатора, а лишь случай резонанса контуров. Уравнение (3) чрезвычайно упростится, если положить, что

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 \text{ и } w_1 C_1 = w_2 C_2.$$

Эти условия могут быть написаны в другом, еще более симметричном виде:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (4)$$

Как не трудно видеть при условии (4), уравнение (3) распадается на два квадратных:

$$\begin{aligned} (L_1 C \rho^2 + w C \rho + 1) - M \sqrt{C_1 C_2} \rho^2 &= 0 \\ (L C \rho^2 + w C \rho + 1) + M \sqrt{C_1 C_2} \rho^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5).$$

Здесь у произведений LC и wC значки опущены, так как на основании условия (4) эти произведения имеют одну и ту же величину независимо от того, к какому контуру они относятся.

Решая уравнения (5), получим:

$$\begin{aligned}\rho_{1,2} &= \frac{-wC \pm \sqrt{wC - 4LC(1-z)}}{2LC(1-z)} = \\ &= \frac{1}{2(1-z)} \cdot \frac{wC}{LC} \pm \sqrt{\frac{1}{4(1-z)^2} \cdot \left(\frac{wC}{LC}\right)^2 - \frac{1}{LC(1-z)}} = \\ &= \alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - \frac{1}{LC(1-z)}} = -\alpha_1 \pm j\omega_1 \\ \rho_{3,4} &= \frac{wC \pm \sqrt{wC - 4LC(1-z)}}{2LC(1-z)} = \\ &= \frac{1}{2(1-z)} \cdot \frac{wC}{LC} \pm \sqrt{\frac{1}{4(1-z)^2} \cdot \left(\frac{wC}{LC}\right)^2 - \frac{1}{LC(1-z)}} = \\ &= \alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - \frac{1}{LC(1-z)}} = \alpha_2 \pm j\omega_2.\end{aligned}$$

Написанные нами выражения для корней требуют некоторых пояснений. Прежде всего в них введен коэффициент связи x на основании определяющего его величину равенства $M^2 = x^2 L_1 L_2$. Затем нужно указать, что выражения под корнем мы заранее считаем меньшим единицы, так как нас интересует только колебательный режим трансформатора. Условия для наличия колебаний в нашем случае выражаются таким образом:

$$\frac{1}{4(1 \pm x)^2} \left(\frac{wC}{LC}\right)^2 - \frac{1}{LC(1 \pm x)} < 0 \text{ или } w < 2\sqrt{\frac{L}{C}(1 \pm x)}.$$

Как мы видим, это условие отличается от аналогичного условия, относящегося к одному контуру, лишь присутствием коэффициента связи.

Написав по общеизвестным правилам решение системы дифференциальных уравнений (2) и заменив в них множители с мнимыми показателями их выражением в зависимости от тригонометрических функций, получим для V_1 и V_2 :

$$\left. \begin{aligned}V_1 &= [A_{11} \cos \omega_1 t + A_{12} \sin \omega_1 t] e^{-\alpha_1 t} + [B_{11} \cos \omega_2 t + \\ &\quad + B_{12} \sin \omega_2 t] e^{-\alpha_2 t} \\ V_2 &= [A_{21} \cos \omega_1 t + A_{22} \sin \omega_1 t] e^{-\alpha_1 t} + [B_{21} \cos \omega_2 t + \\ &\quad + B_{22} \sin \omega_2 t] e^{-\alpha_2 t}\end{aligned} \right\} (6)$$

Вернемся теперь к основному условию (4), которое позволило упростить решение характеристического уравнения, и попытаемся выяснить его физическое значение. Из выражений (6) мы видим, что даже при столь значительном упрощении вопроса, которое дается нам условием (4), все же в каждом контуре будет происходить по два колебания одновременно и притом с различной частотой ω_1 и ω_2 . Условие (4) дает только, что затухания этих колебаний будут происходить одинаково как в первом, так и во втором контуре. Действительно

$$\alpha_1 = \frac{1}{2(1-z)} \cdot \frac{wC}{LC} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{1}{2(1+z)} \cdot \frac{wC}{LC}.$$

Следовательно α_1 и α_2 зависят не от отдельных значений L_1 , C_1 , w_1 и L_2 , C_2 , w_2 , а от произведений wC и LC , имеющих по условию (4) одинаковые значения для обоих контуров. Пользуясь (4), можно получить коэффициент трансформации непосредственно из основных дифференциальных уравнений (2). В самом деле, обозначим коэффициент трансформации через $S = \frac{V_2}{V_1}$ и заменим в первом из уравнений (2) V_1 через V_2/S и $\dot{V}_2$ через $V_1 S$, получим:

$$L_1 C_1 \frac{d^2 V_2}{dt^2} + w_1 C_1 \frac{dV_2}{dt} + V_2 + MS^2 C_2 \frac{d^2 V_1}{dt^2} = 0.$$

Сравнивая это уравнение со вторым (2) и принимая во внимание условие (4), видим, что $S^2 C_2 = C_1$, откуда $S = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$.

Мы ограничимся здесь этим исследованием, так как оказывается, что даже рассмотренный нами простейший случай был бы слишком сложен на практике. Чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить, что выражения (6) указывают на одновременное существование двух колебаний в контурах с частотами ω_1 и ω_2 . В результате их одновременного существования мы должны получить биения. Чтобы избежать этого неприятного явления, обычно пользуются так называемым ударным возбуждением. При таком возбуждении первичный контур, после того как в нем возбуждены колебания, автоматически размыкается и таким образом выключается из системы. Достигается это соответствующим

устройством разрядников. Когда первичный контур выключен, то $x=0$, следовательно и $\omega_1=\omega_2$ (см. выражения для ρ) и мы во вторичном контуре будем иметь только одно колебание. В этом случае вторичный контур будет иметь колебания с частотой $\omega = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{w}{L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$. Эта частота, как известно, есть частота собственных свободных колебаний контура, состоящего из емкости, самоиндукции и омического сопротивления. Если еще одна причина, о которой мы скажем ниже и благодаря которой на практике приходится ограничиваться ударным возбуждением, если дело идет о лабораторном способе получения высокого потенциала. Если же это так, то почти вся теория пригодного для лабораторных работ Тесла-трансформатора сводится к рассмотрению колебаний энергии в замкнутом контуре. Этот вопрос достаточно разработан и мы остановимся здесь лишь на самом существенном, имеющем непосредственное отношение к конструкции трансформатора Тесла.

Джоулево тепло во вторичной спирали Тесла-трансформатора с ударным возбуждением

При обычной работе с Тесла-трансформаторами почти совсем не приходится принимать во внимание расход энергии на нагревание проводов. Однако это наблюдается лишь при небольшом числе искр, которые проскакивают через разрядник в первичном контуре при ударном возбуждении. В этом случае омическим сопротивлением можно действительно пренебречь и рассчитывать силу тока только исходя из так называемого волнового сопротивления. Если максимальное напряжение на концах вторичной спирали будет E_0 , а L и C — ее самоиндукция и емкость, то максимальная сила тока выразится следующим образом $J_0 = \frac{E_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$, здесь $\sqrt{\frac{L}{C}}$ есть

упомянутое выше волновое сопротивление. Иначе обстоит дело с незатухающими колебаниями. Ниже мы приведем

опыты и расчеты с трансформатором Тесла на незатухающих колебаниях. Из этих опытов, сделанных Рукавишниковым, вытекает, что трансформатор Тесла, работающий на незатухающих колебаниях, потребляет громадное количество энергии. Так как эта энергия тратится главным образом на джоулево тепло, то нагревание спирали оказывается очень сильным. Таким образом Тесла-трансформатор с незатухающими колебаниями или с очень большим числом искр в секунду по своим свойствам уже начинает приобретать недостатки, о которых мы говорили в начале при упоминании о высоковольтных технических трансформаторах. Для того чтобы построить Тесла-трансформатор с незатухающими колебаниями, приходится потреблять большую мощность и брать толстые провода, способные выдерживать сильное нагревание. В этом и заключается вторая причина, по которой для получения высоких напряжений в лаборатории приходится пользоваться ударным возбуждением. Здесь мы имеем полную аналогию с получением громадных магнитных полей по методу Капицы. Для получения таких полей, как известно, пускается через соленоид на очень короткий промежуток времени ток большой силы. Период времени, в течение которого соленоид охлаждается (так сказать отдыхает), во много раз больше, чем тот промежуток, в течение которого создается магнитное поле. То же самое по существу мы имеем и при ударном возбуждении. Хотя искры из вторичной спирали трансформатора и кажутся выходящими непрерывно, но в действительности трансформатор отдыхает гораздо больше времени, чем работает. Этот результат, конечно, нельзя назвать особенно утешительным, но все же и с кратковременными сильными электрическими полями можно надеяться получить целый ряд интересных результатов, если только удастся ввести их в вакуумную трубку.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХПОТЕНЦИАЛОВ

Еще сам изобретатель Тесла-трансформатора извлекал из него громадные и мощные искры, но измерять потен-

циалы экспериментальным путем удалось только в самое последнее время. Первую попытку в этом направлении встречаем у Вольфке в 1923 г.¹ Вольфке присоединил ко вторичной спирали Тесла-трансформатора большую катодную трубку, из которой непрерывно откачивался выделяющийся из электродов газ. Наблюдая отклонение катодного пучка в заданном магнитном поле, можно было определить максимальную скорость электронов и следовательно максимальный потенциал. Вольфке определил потенциал своего Тесла-трансформатора в 600 000 вольт. Такой метод нельзя считать особенно удобным, так как присоединение трубки увеличивает емкость вторичной спирали и ухудшает таким образом коэффициент трансформации S (см. выше). Кроме того, как на это указывает и сам Вольфке, катодной трубкой нельзя пользоваться для измерений потенциалов более высоких, чем 600 000 вольт, так как при дальнейшем повышении разряды со спирали начинают происходить в окружающий воздух. Все же Вольфке удалось проверить экспериментально и доказать возможность получения высоких потенциалов при помощи трансформатора Тесла. Рукавишников вначале также пользовался для измерения потенциала катодной трубкой, подобной той, которая описана у Вольфке. Впоследствии однако Рукавишников по моему предложению применил для этой цели катодную осциллографическую трубку Western Electric Company. Особенностью этой трубки является низкое катодное напряжение — всего 300 — 400 вольт — и следовательно малая скорость электронов в катодном пучке. Общий вид трубки и установки, которой пользовался Рукавишников, изображен на рис. 2.

Благодаря малой скорости электронов в этой трубке катодный пучок и пятнышко на фосфоресцирующем экране может отвечать колебаниям очень большой частоты. Громадным преимуществом измерения потенциала при помощи такой трубки является то обстоятельство, что она помещается на большом расстоянии от трансформатора и по

¹ M. Woltke. Phys. ZS. № 12, 1923.

своим размерам настолько мала, что не оказывает заметного влияния даже на режим небольших моделей Тесла-трансформатора. Самое измерение потенциала производилось следующим образом. Вначале трубка помещалась между двумя пластинами плоского конденсатора, к обкладкам которого присоединялась известная разность потенциалов. Меняя поле между обкладками конденсатора, можно было проградуировать трубку для нужных значений потенциала.

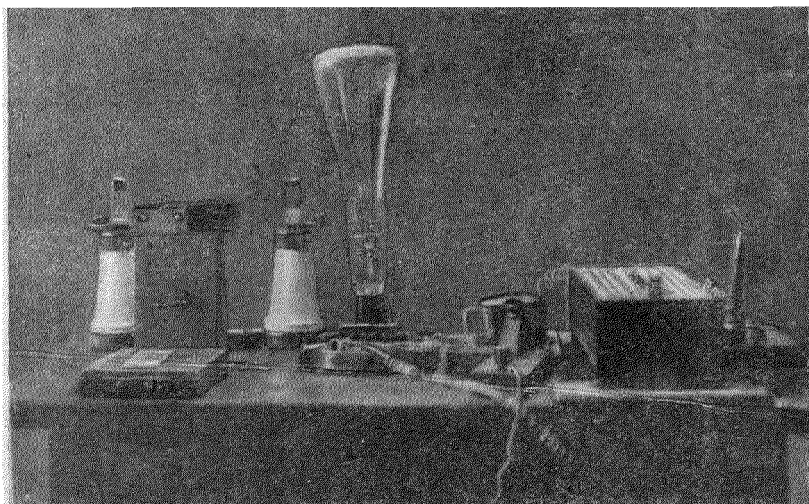


Рис. 2

После градуировки трубка ставилась на некотором расстоянии от работающего трансформатора Тесла. Пятно на фосфоресцирующем экране под влиянием переменного поля высокой частоты вытягивалось в линию. Длина этой линии и давала возможность определить напряжение поля в данном месте. Приближая и удаляя трубку, можно было найти закон изменения напряжения поля с расстоянием. Потенциал на конце вторичной спирали трансформатора определялся путем интерполяции. Чтобы окончательно убедиться в том, что катодный пучок отклоняется исключительно под влиянием только электрического поля, трубка в контрольных опытах экранировалась медным листом, после чего ко-

лебания пятна на экране прекращались. Таким путем Рукавишникову удалось измерить напряжение на трансформаторе Тесла, работавшем при ударном возбуждении, и проверить некоторые из сделанных им расчетов. Интересно отметить, что та же мысль применить катодный осциллограф для измерений потенциала совершенно независимо от работ в Радиевом институте (работа В. Н. Рукавишникова еще не напечатана) пришла Г. Брейту, Тюве и Далю.¹ Хотя названные американские физики и пользовались только что описанным методом, но наиболее высокий потенциал был измерен ими другим способом. Они указывают несколько причин, заставивших их перейти к другому методу измерений. Прежде всего метод с трубкой оказался непригодным для измерения потенциала трансформатора, находившегося в масле под большим давлением, так как сосуд, в котором помещался трансформатор, был сделан из металла. Для целей измерения нужно было заменять металлический сосуд деревянным, но тогда давление, под которым находилось масло, приходилось уменьшать, что в свою очередь вело к уменьшению получаемого потенциала. Кроме того, так как Тесла-трансформатор работал на ударном возбуждении, то колебания пятна происходили не все время и потому яркость линии на флюоресцирующем экране была слишком мала, для того чтобы точно измерить ее длину. Все это вместе взятое заставило названных авторов применить другой способ измерения, к описанию которого мы и перейдем. На рис. 3, на котором схематически изображена их установка, видно, что в сосуде с маслом находится кроме самого трансформатора небольшой шаровой электрод. Этот электрод соединен через изолирующий ввод с искровым промежутком, находящимся вне сосуда. При работе Тесла-трансформатора в шаровом промежутке появлялась разность потенциалов, которая может быть измерена. Для того, чтобы найти потенциал на трансформаторе, нужно установить, во сколько раз этот потенциал больше потенциала на вспомогательном разряднике. Отно-

¹ Phys. Rev. 35, 51, 1930.

шение потенциалов определялось путем специальной и сложной градуировки. Главным недостатком этого метода является несомненно то обстоятельство, что градуировать всю установку приходится при потенциалах гораздо более низких, чем измеряемый, и потом экстраполировать. Все же при помощи этого, хотя и несовершенного, метода американцам удалось изменять потенциалы до 5 000 000 вольт с точностью, как они считают, до 10^0_{10} .

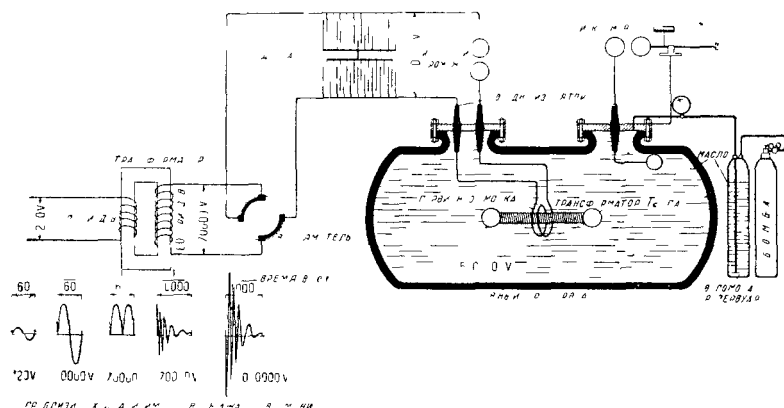


Рис. 3

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА НА НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЯХ

Мы уже выяснили преимущество трансформатора Тесла, работающего при ударном возбуждении. Чтобы окончательно убедиться в правильности такого заключения и вместе с тем подробнее изучить свойства Тесла-трансформатора, в Радиовом институте Рукавишниковым было построено несколько моделей, работавших на незатухающих колебаниях. Источником колебаний для этих моделей служила генераторная лампа мощностью в 250 ватт. Теория Тесла-трансформатора, включающая в себя элементы и режим генераторной лампы, слишком сложна и потому мы совсем не будем на ней останавливаться. Вместо этого просто предположим, что какой-либо источник колебаний создает в пер-

вичном контуре переменную электродвижущую силу K . Тогда уравнения (1) можно написать так:

$$\begin{aligned} K &= W_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + V_1 + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= W_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + V_2 + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

Общий интеграл этих дифференциальных уравнений, как известно, отличается от общего интеграла уравнений (2) лишь присутствием добавочного члена, содержащего периодическую функцию. Эта последняя представляет собой частное решение системы уравнений (10). Нетрудно понять физический смысл такого решения. При включении тока в трансформаторе возникают колебания, подобные тем, которые были нами разобраны в трансформаторе с затухающими колебаниями, но так как в дальнейшем питание трансформатора происходит без каких-либо перерывов, то эти колебания после затухания не возобновляются. Следовательно остаются лишь колебания, соответствующие периодической функции, не содержащей фактора затухания. Таким образом задача сводится к отысканию частного решения системы уравнений (10). В данном случае это частное решение может быть найдено и задача решается до конца. Так как трансформатор Тесла на незатухающих колебаниях не представляет собой особого интереса, то мы приведем лишь некоторые результаты теоретических выводов и сравним их с опытными данными. Прежде всего укажем, что на опыте действительно подтверждается наличие лишь одного колебания в трансформаторе Тесла на незатухающих колебаниях. Об этом можно судить по интенсивности и равномерной яркости линии, получающейся на экране катодного осциллографа. Кроме того меняется и самый характер разряда в воздухе. Вместо отдельных змеевидных искры получаем „факел“, горящий с удивительным постоянством и устойчивостью. Потенциал на таком трансформаторе может быть промерен при помощи катодной трубки с большой точностью, так как линия, в которую вытягивается пятно, также имеет постоянную длину и вполне устойчива. Измеряя потенциал, можно проверить правиль-

ность вычислённого коэффициента трансформации. Однако наиболее интересным оказывается вопрос, связанный с потерями во вторичном контуре на джоулево тепло. Мощность, расходуемая на потери в проводнике, как известно, может быть выражена произведением $V_2 J_2 \frac{\cos \varphi}{2}$, где V_2 и J_2 потенциал и сила тока во вторичной спирали трансформатора; $\cos \varphi$ в этом случае имеет значение равное $\frac{W_2}{2\omega L}$. Соответствующим подбором элементов трансформатора можно сделать $\cos \varphi$ очень малым. Тогда ваттная составляющая $J_2 \cos \varphi$ будет также очень мала по сравнению с полной силой тока J_2 . Здесь так же, как и в трансформаторе с затухающими колебаниями, сила тока будет регулироваться главным образом волновым сопротивлением $\sqrt{\frac{L}{C}}$, так что, пренебрегая небольшим ω , можно положить $J_2 = \frac{V_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$, но все

же при больших V_2 произведение V_2 на $J_2 \cos \varphi$ получает практически колоссальную величину и значение. Все это было подтверждено Рукавишниковым на опыте. Он пробовал применять к одной и той же модели трансформатора Тесла ударное возбуждение и незатухающие колебания. При этом оказалось, что в первом случае во вторичной спирали нельзя было обнаружить ни малейших следов нагревания, а во втором проволока на заземленном конце спирали, где находится пучность тока, нагревалась до красного каления. Для тех моделей, которыми пользовался Рукавишников (средняя величина их такая же, как и тех моделей, которыми пользуются на лекциях для демонстрации резонанса электрических колебаний), нельзя было даже использовать полной мощности генераторной лампы в 250 ватт, так как это повело бы к расплавлению проволоки на вторичной спирали. Все это с особой наглядностью показывает, что о применении трансформатора Тесла на незатухающих колебаниях для лабораторных целей нечего и думать. Как иллюстрацию приведем один из приближенных расчетов, сделанных Рукавишниковым для

Тесла-трансформатора на незатухающих колебаниях. Заданное напряжение 7 000 000 вольт, $\cos \varphi$ всего 0,005 и, несмотря на это, потребная мощность равна 11 тысячам киловатт, то есть одной пятой Волховстроя. Очевидно, что при такой мощности о постройке небольшого лабораторного трансформатора говорить не приходится.

Ввод высокого потенциала в вакуумные трубки

Если говорить о лабораторном способе получения высокого потенциала, то никак нельзя обойти вопроса о вводе этого потенциала в вакуумные трубки. Как известно, Кулидж разрешил этот вопрос для одного миллиона вольт, взяв каскадное соединение нескольких отдельных трубок. Так же подошли к этому и Тюве, Брейт и Хавстэд.¹ Главными моментами при устройстве таких трубок явились по словам авторов: 1) подразделение всей трубки на секции; 2) равномерное распределение вольтажа между отдельными секциями при помощи потенциометра; 3) наружная электростатическая защита секций. Все эти приспособления видны на приведенных рисунках. На рис. 4 изображена трубка из шести отдельных секций.

Внутренние электроды этой трубки состоят из цилиндрических медных трубок с закругленными краями. Соединение электродов происходило через выводы, герметичность которых достигалась при помощи обычной замазки. Такой способ вывода электродов не позволял нагревать всю трубку в электрической печи для освобождения ее от газа, но каждый электрод в отдельности нагревался в кварцевой трубке при температуре в 950°C. Потенциометр состоял из стеклянной трубки, наполненной слабым раствором соли в воде. Секции потенциометра соединялись с соответствующими электродами трубки. Внешний вид потенциометра дан также на рис. 4.

На том же рисунке изображены и два щита, — один

¹ Phys. Rev. 35, 66, 1930.

кольцевой и один в виде колокола. Кольцевые щиты надевались на секции, а колокола служили для защиты концов.

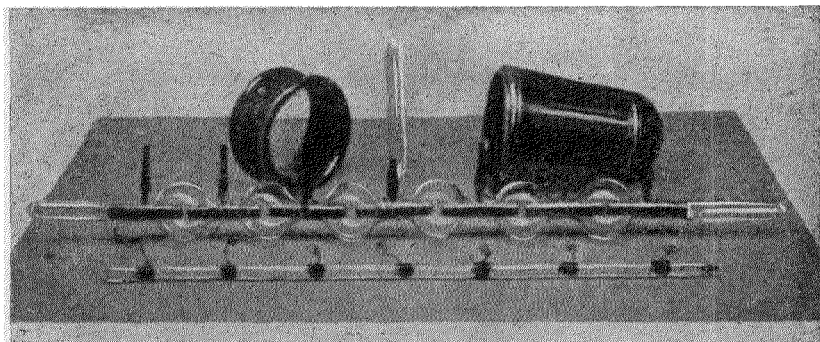


Рис. 4

На рис. 5 изображена трубка из пятнадцати секций и нескольких щитков.

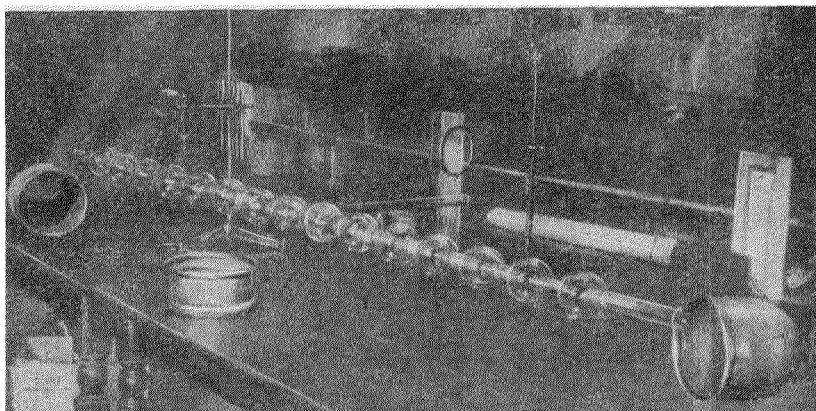


Рис. 5

На следующем рисунке показан монтаж той же трубки, уже покрытой щитками около спиралей Тесла-трансформатора.

Авторы подчеркивают, что электростатическая защита трубки оказалась совершенно необходимой. На первый взгляд могло казаться, что, пользуясь принципом, предложенным Кулиджом, можно идти как угодно далеко в повышении потенциала. На деле это вышло не совсем так. Даже к трубке с пятнадцатью секциями не удалось приложить потенциала большего, чем 1 400 000 вольт. К трубке же в шесть секций можно было приложить только 850 000 вольт. Причин, по которым это не удалось, много, и некоторые из них еще не ясны.

Во всяком случае можно сказать, что очень трудно управлять разрядом при таких высоких потенциалах. Даже если бы можно было совершенно откачать все газы из трубки, то приходится считаться еще с холодным испусканием

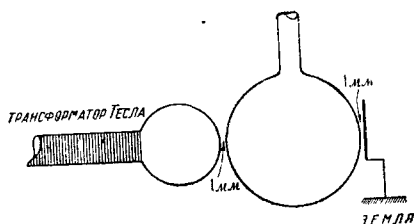


Рис. 6

электронов и следовательно с образованием поверхностных зарядов на стекле. В действительности же всегда остается некоторое количество газа, участвующего в разряде, понижающего разность потенциалов и создающего объемные заряды, нарушающие правильное

распределение электрического поля. Следует упомянуть еще об опытах двух из указанных авторов с без-электродной трубкой из пирекса. Схематическое расположение приборов указано на рис. 6.

Разность потенциалов между электродом и землей равнялась 1 000 000 вольт. Какие условия необходимы для действия такой трубки, еще нельзя в точности сказать. По мнению авторов для работы такой без-электродной трубки необходимо присутствие на внешней поверхности стекла частично проводящего электричество слоя. Этот слой в описанных опытах мог образоваться потому, что как трубка, так и трансформатор, были погружены в масло, насыщенное углекислым газом, создававшимся давлением.

ТЕСЛА - ТРАНСФОРМАТОР СО ВТОРИЧНОЙ СПИРАЛЬЮ, ПОМЕЩЕННОЙ В ВАКУУМЕ

Другой способ решения вопроса — это помещение вторичной спирали трансформатора Тесла целиком в вакуумную трубку. Этот способ был впервые применен мною и Рукавишниковым еще в 1922 г.¹ Один конец вторичной спирали заземлялся, тогда, как известно, на другом конце получается пучность потенциала. Наружу выводился заземленный конец спирали. Очевидно, что при такой конструкции опасность от высокого потенциала устраняется совершенно, так как вывод находится при потенциале 0. При ударном возбуждении и небольших моделях устроить такой вывод не представляет никаких затруднений, так как несмотря на то, что у заземленного конца находится пучность тока, проволока в этом месте почти не нагревается. Иначе обстоит дело при незатухающих колебаниях или при больших спиралях. Как мы уже указывали выше, в этом случае нагревание проволоки делается настолько сильным, что ввод непосредственно через стекло неминуемо поведет к образованию трещины. Обойти это затруднение сравнительно легко; достаточно взять более толстую платиновую проволоку и сделать не один, а несколько вводов, с таким расчетом, чтобы плотность тока, приходящаяся на каждый ввод, не превосходила допустимой величины. На рис. 7 приведена одна из такого типа установок, собранных Рукавишниковым.

В верхней части рисунка видна вторичная спираль трансформатора, помещенная в стеклянную трубку, соединенную с трехступенчатым диффузионным насосом Геде. Другим концом трубка со спиралью входит внутрь самоиндукции первичного контура. На столе находятся емкость первичного контура, состоящая из конденсатора переменной емкости радиотелеграфного типа, и генераторная лампа с различными элементами, входящими в ее контур. На маленьком столике слева собрана установка с катодным осциллогра-

¹ Доклады Академии наук 1922 г.

фом, служившая для промера напряжения. Несмотря на всю простоту описанной установки, имеются чисто технические трудности, которые приходится преодолевать главным образом при помещении спирали в вакуум. Прежде всего необходимо указать на то, что до сих пор Рукавишникову удавалось помещать в вакуум только небольшие спирали, для которых нужны были трубки диаметром не больше

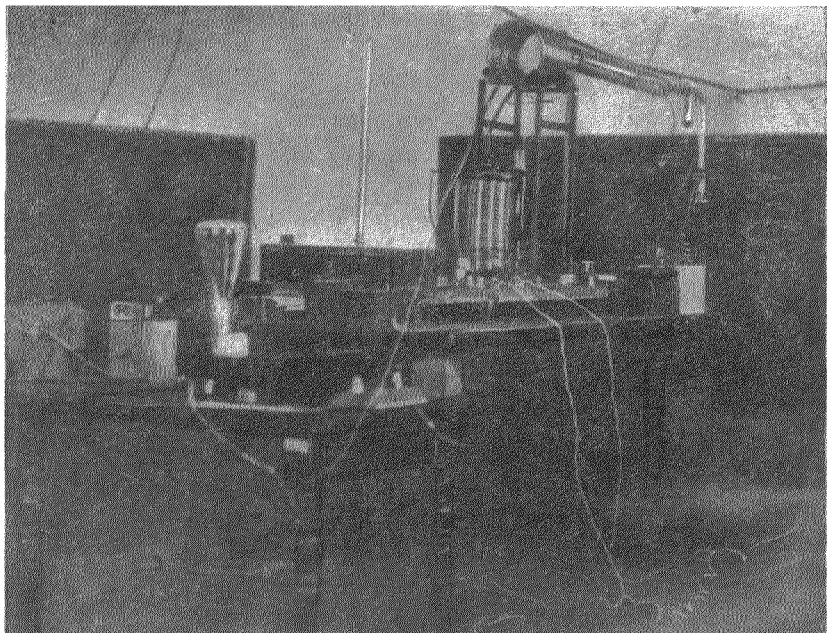


Рис. 7

8—10 см. Трубки большего диаметра не поддаются уже стеклодувной обработке и их пришлось бы специально отливать на стеклянном заводе. Но даже при наличии такой трубы (одна из специально отлитых труб имеется в Радиовом институте) появляется новое затруднение, связанное с получением высокого вакуума. Между тем даже у небольших моделей, у которых имеются только стеклянные соединения, не удается достичь достаточно хорошего вакуума. Несмотря на непрерывную работу мощных насосов (диффу-

зионный Геде или молекулярный Гольвэка), высокий вакуум держится лишь первые моменты после включения тока, а затем при постепенном выделении газов получается постепенно усиливающееся свечение. Причины несовершенства вакуума здесь почти те же, что и при употреблении каскадного соединения трубок. Попытки вставить трубку со вторичной спиралью в электрическую печь с целью удалить адсорбированные газы прогреванием потерпели неудачу. При высокой температуре сказывается разница между коэффициентом расширения медной проволоки и стеклом цилиндра, на который она намотана. В результате витки сползают и соединяются между собой, во много раз уменьшая самоиндукцию. Таким образом пока приходилось довольствоваться лишь моментами хорошего вакуума и тогда промерять напряжение. Очевидно, что эти затруднения еще более будут сказываться при попытках заключить вторичную спираль в большой стеклянный цилиндр, так как придется часть соединений сделать на замазке. Все перечисленные здесь трудности несомненно значительны, но их никоим образом нельзя назвать непреодолимыми. Поэтому вряд ли можно сомневаться, что в дальнейшем при постройке вакуумных трубок, предназначенных для работы с трансформатором Тесла, и сама вторичная спираль этого трансформатора будет помещаться в вакууме и как бы служить одним из электродов. Другой электрод может быть при этом впаян с другого конца трубки и иметь любую форму в зависимости от той цели, для которой предназначена сама трубка. Разряд в такой трубке при очень высоком напряжении может происходить и без накаливающегося катода (холодное испускание электродов), что еще больше упрощает ее конструкцию.

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА НА 5 000 000 ВОЛЬТ В МАСЛЕ

Для того чтобы судить о величине потенциала на трансформаторе Тесла, необходимо не допускать разряда со вторичной спирали в воздух. Чтобы узнать, насколько понижается потенциал при разряде трансформатора в воздух,

Рукавишниковым были поставлены специальные опыты с трансформатором на незатухающих колебаниях. Наблюдалась амплитуда колебаний пятна осциллографической трубки, помещенной вблизи трансформатора, работавшего на незатухающих колебаниях. Ток в первичном контуре трансформатора постепенно повышался до тех пор, пока не начинались разряды в воздух. При возникновении разрядов амплитуда колебаний осциллографа резко уменьшалась. Поэтому вполне понятно, что Г. Брейт, М. Тюве и О. Доль, стремясь получить на трансформаторе возможно более высокий потенциал, прежде всего позаботились об уничтожении разрядов. Хотя названные авторы со своей стороны также считают, что лучше всего было бы поместить вторичную спираль трансформатора в вакуум, но так как до сих пор технические затруднения, о которых мы говорили выше, еще не преодолены, то они остановились на погружении всего трансформатора в масло при давлении, которое доходило до 500 фунтов на квадратный дюйм. Схематически их установка изображена на рис. 3.

Ток из обычного трансформатора проходил через выпрямитель при напряжении в 70 000 вольт. Так как переменный ток имел 60 периодов в секунду, то выпрямитель заряжал конденсатор первичного контура 120 раз в секунду. Очевидно, что таково же было и число разрядов через искровой промежуток первичного контура. Конденсатор, который употреблялся для получения наиболее высоких вольтажей, состоял из зеркальных стекол в 40 квадратных дюймов каждое, оклеенных с обеих сторон листами станиоля в 0,003 дюйма толщины. Все пластины конденсатора были помещены в деревянный каркас. Емкость конденсатора была равна 1,6 микрофарады.

На куске трубки длиной всего в один метр и диаметром в 8 см была намотана в один слой медная проволока. Весь цилиндр содержал от 5 000 до 7 000 витков. На концы спирали надевались крышки сферической формы диаметром приблизительно в 25 см. Первичная спираль, также изображенная на рисунке 8, настолько проста, что не требует дальнейших пояснений. Трансформатор

Тесла целиком погружался в заполненный маслом сосуд. Самый сосуд был сделан из прочного котельного железа и наполнен легким трансформаторным маслом. Это масло выдерживало без пробоя напряжение в 46000 вольт на миллиметр. Давление сосуда создавалось бомбой с углекислотой, также показанной схематически на рис. 3. Метод определения потенциала, которым пользовались авторы, был уже описан нами раньше при рассмотрении различных способов измерения потенциала на трансформаторе Тесла. Коэффициенты трансформации, полученные в различных условиях, приведены в нижеследующей таблице:

Т а б л и ц а 1

Диаметр крышек в дюймах	Число вит- ков в пер- вичной спирали	Емкость первичного контура в микрофара- дах	Кoeffи- циент трансфор- мации
Проволока с двойной шелковой изоляцией			
5 {	2	0,19	101
	3	0,13	85
6 {	2	0,26	104
	3	0,16	106
8 {	2	0,33	106
	3	0,22	99
	4	0,15	83
19 {	2	0,41	121
	3	0,30	112
	4	0,20	94
Эмалированная проволока.			
5 {	3	0,45	162
	4	0,33	147
	5	0,23	115
	6	0,19	87
6 {	4	0,48	123
	5	0,37	113
	6	0,27	97
8 {	4	0,60	131
	5	0,45	118
	6	0,33	107
10 {	5	0,54	137
	6	0,45	119

Как видно из этой таблицы, коэффициент трансформации довольно высок и колеблется около 100. В одном случае он

оказался даже равным 162. Интересно сравнение Тесла-трансформатора с радием, которое делают авторы, пользуясь своими данными о величине достигнутого ими потенциала. Исходя из того, что средний ток во вторичной спирали при 120 искрах в секунду равен $3 \cdot 10^{-5}$ А, можно найти число ионов, необходимое для переноса этого количества электричества.

Это число будет $\frac{3 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,9 \cdot 10^{14}$. Так как эти ионы

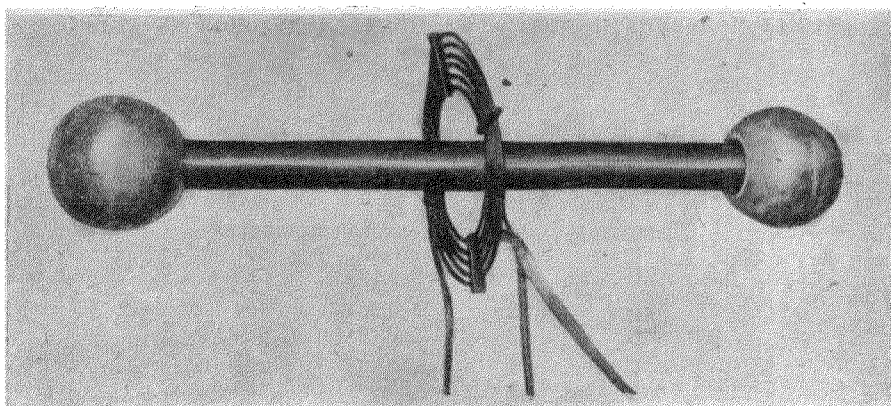


Рис. 8.

пройдут поле в 5 000 000 вольт, то энергия их будет соответствовать энергии α -частиц, испускаемых радием. Если число альфа-частиц, которое мы получаем от одного грамма радия в одну секунду, равно $3,5 \cdot 10^{10}$, то принимая во внимание, что каждая α -частица несет двойной заряд, получим, что трансформатор Тесла на 5 000 000 вольт эквивалентен по своему действию $\frac{1,9 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 3,5 \cdot 10^{10}} = 2600$ граммам металлического радия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества трансформаторов Тесла оценены в настоящее время не только физиками, но и техниками. Во многих фирмах такие трансформаторы успешно заменяют

технические высоковольтные трансформаторы с коэффициентом связи, близким к единице. В Америке делались даже попытки применить эти трансформаторы для искусственного дождевания. Несомненно однако, что больше всего трансформатор Тесла интересует физиков, так как они надеются при его помощи добиться искусственного превращения элементов. На основании изложенного в этой статье можно сказать, что эти надежды не лишены основания. Теория трансформатора, работающего при ударном возбуждении, проста и в настоящее время проверена на опыте. Из теоретических данных, видно, что мы можем почти беспредельно идти по пути извлечения потенциала. Все затруднение заключается лишь в том, чтобы не давать этим высоким потенциалам бесполезно расходоваться на образование искр и пробой диэлектрика. Несомненно, что в дальнейшем придется остановиться на трансформаторе, у которого вторичная спираль будет находиться в вакууме. При некотором прогрессе вакуумной техники можно ожидать, что окончательная очистка трубки от остатков газа будет производиться уже самим трансформатором. Под влиянием громадных электрических полей ионы будут глубоко внедряться в стенки сосуда и не скоро оттуда выйдут. Поместив в таком трансформаторе заземленный электрод возможно близко к концу вторичной спирали, мы почти достигнем идеала — громадная разность потенциалов в малом объеме.