

## ИНЕРЦИОННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕМЕРОВ

**1. Введение.** Электростатический полемер состоит из датчика напряженности электрического поля и вторичного прибора, регистрирующего выходное напряжение датчика. Совокупность тех элементов полемера, которые электрически соединены с входной клеммой вторичного прибора, будем называть антенной. Предположим, что между отдельными деталями антенны нет заметного переходного сопротивления, а нагрузка антенны эквивалентна пассивной параллельной  $RC$  — цепи.

Известны коллекторные полемеры (установка Бенндорфа), индукционные полемеры (прибор Вильсона, вариометр напряженности, регистратор атмосфериков) и генераторные полемеры (электростатический флюксметр). Проблема инерционности наиболее важна для коллекторного метода измерения. Оказывается, что полное описание инерционности коллекторной антенны возможно лишь в общей теории, рассматривающей разные методы измерения как частные случаи.

Сосредоточивая внимание на инерционности антенны полемера, не будем учитывать возможную инерционность вторичного прибора.

Основные мысли, изложенные в настоящей статье, не новы. Они встречаются уже в работах Грене [1], [2], которые, к сожалению, почти неизвестны. Работы, в которых выводы Грене не игнорированы, — редкое исключение [3], [4]. Это побудительная причина настоящей статьи. Автор попытается избежать абстрактности, характерной для всех упомянутых работ [1—4], и постарается достигнуть максимальной доступности рассуждений.

**2. Антенна Бенндорфа.** Бенндорф разработал весьма удачную конструкцию полемера и, что еще важнее, создал теорию коллекторных приборов [5]. Выводы Бенндорфа излагаются почти в неизменном виде и в современных монографиях [6, 7]. Резюмируем теорию Бенндорфа.

В стационарном электрическом поле коллекторная антенна приобретает потенциал так называемой референц-точки  $U_R$ , который пропорционален напряженности  $E$  электрического поля,

$$U_R = -h_R E. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $h_R$  будем называть проводимостной действующей высотой антенны. Формулу (1) следует рассматривать как определение параметра  $h_R$ .

Если потенциал антенны  $U$  отличается от  $U_R$ , то возникает проводимостный ток, который приближает  $U$  к значению  $U_R$ . Коллектор увеличивает проводимость воздуха около себя и ускоряет этот процесс. По Бенндорфу, антенна ведет себя так, будто она соединена с референц-точкой через кажущееся сопротивление антенны  $R$ , которое определяется в основном проводимостью воздуха около коллектора. Инерционность обусловлена собственной емкостью антенны  $C$ .

Инерционность антенны количественно описывается переходной характеристикой, изображающей функцию  $U(t)$  после скачкообразного изменения напряженности электрического поля. Электрические схемы, переходные характеристики которых совпадают с переходной характеристикой антенны, являются ее эквивалентными схемами. Эквивалентная схема антенны, подчиняющейся теории Бенндорфа, представлена на рис. 1, 1, а ее переходная характеристика — на рис. 1, 1а. Кривая 1 изображает функцию  $U_R(t)$ , кривая 2 — функцию  $U(t)$ . Постоянная времени экспоненциального переходного процесса  $\tau = RC$ .

Антенну, обладающую описанными свойствами, будем называть антенной Бенндорфа. Это идеализированная модель, существующая только в воображении.

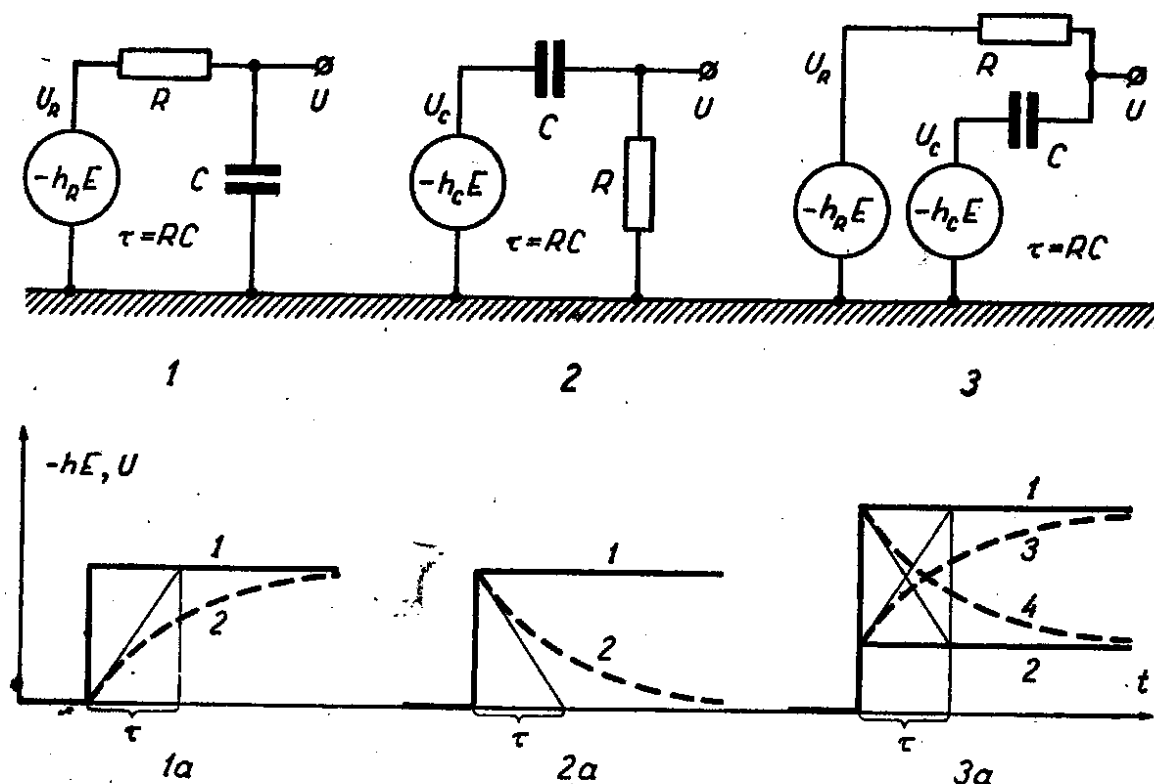


Рис. 1. Эквивалентные схемы и переходные характеристики антенн. 1, 1а — антенна Бенндорфа; 2, 2а — чистоиндукционная антенна; 3, 3а — уточненная модель антенны.

В переменном электрическом поле потенциал антенны Бенндорфа следует ультранизкочастотным колебаниям напряженности, с некоторым ослаблением передает колебания с частотой порядка  $\omega \approx \tau^{-1}$  и совсем не реагирует на колебания напряженности при  $\omega \rightarrow \infty$ .

Для достижения малой инерционности рекомендовались высокоактивные коллекторы. Известно, что увеличение активности коллектора приводит к нежелательным последствиям в отношении других свойств полемера.

**3. Несовершенство теории Бенндорфа.** Не будем обращать внимания на нелинейность кажущегося сопротивления коллектора, конвективный ток и другие явления, не относящиеся к нашей теме.

В теории Бенндорфа скорость изменения потенциала антенны  $dU/dt$  пропорциональна разности  $U_R - U$ , что позволяет по значениям  $U$  и  $dU/dt$  оценить  $U_R$  и соответствующую истинную напряженность.

Если таким способом практически определить значение  $E$  по записи  $U(t)$  после быстрого скачка напряженности (грозовые разряды), то весьма часто получается нелепый результат — вычисленное значение  $E$  значительно превышает пробивную напряженность. Такие наблюдения обычно нельзя объяснить нелинейностью сопротивления коллектора, и они неоспоримо доказывают, что фактическая инерционность коллекторной антенны меньше, чем предсказывает теория Бенндорфа.

Причина расхождения между теорией и опытом представляет практический интерес. Если фактор, уменьшающий инерционность, оказался бы регулируемым, то появилась бы возможность в значительной степени уменьшить или даже совсем устранить инерционность коллекторного полемера.

Почему же указанный недостаток теории не обнаруживается при измерении постоянной времени антенны? Инерционность измерительного прибора проявляется по-разному в разных условиях — понятие инерционности включения прибора отличается от понятия инерционности реакции прибора на изменение сигнала. Постоянная времени антенны измеряется в стационарном поле путем определения функции  $U(t)$  после размыкания заземления антенны. Результат такого опыта зависит от инерционности включения антенны, которая вполне удовлетворительно описывается теорией Бенндорфа. В практике же атмосферно-электрических наблюдений основной интерес представляет инерционность реакции антенны, которая не подчиняется теории Бенндорфа.

**4. Индукционная антенна.** Обычная радиоантенна — практически безынерционный датчик быстрых вариаций электрического поля. Если ограничиваться рассмотрением не слишком высокочастотных составляющих поля, то можно сказать, что индукционная антенна обладает ненаправленным действием и характеризуется постоянной действующей высотой  $h_c$ , определяемой соотношением

$$\Delta U = -h_c \Delta E, \quad (2)$$

где  $\Delta E$  — величина мгновенного скачка напряженности поля,  $\Delta U$  — соответствующий скачок потенциала антенны.

В области высоких частот проводимость воздуха несущественна, и в теории индукционной антенны она обычно не учитывается. Эквивалентная схема антенны с омической нагрузкой  $R$  представлена на рис. 1, 2.  $C$  — собственная емкость антенны. Переходная характеристика этой схемы представлена на рис. 1, 2а, где кривая 1 изображает функцию  $— h_c E(t)$ , а кривая 2 — функцию  $U(t)$ .

Антенну, обладающую описанными свойствами, будем называть чистоиндукционной. Чистоиндукционная антенна неискаженно передает высокочастотные колебания, ослабляет средние частоты и совсем не реагирует на постоянную составляющую электрического поля.

Для измерения постоянной составляющей поля чистоиндукционной антенной необходимы вспомогательные приспособления наподобие экрана прибора Вильсона. Циклическое экранирование антенны исключает непрерывность наблюдений.

**5. Реальная антенна.** Антенна Бенндорфа принимает неискаженно постоянную составляющую электрического поля, чистоиндукционная антенна — высокочастотные составляющие. Нельзя ли создать двухканальный прибор, в котором объединены положительные качества обоих типов антенн? Простейший способ осуществления этого замысла — параллельное включение коллекторной и индукционной антенн.

Как устроен реальный прибор Бенндорфа? Стержень — носитель без коллектора — обычная индукционная антенна. Если прикрепить к стерж-

ню коллектор, то индукционная антенна и коллекторная антенна включаются параллельно.

Первый тезис настоящей статьи — антенну коллекторного полевика следует рассматривать как результат параллельного включения антенны Бенндорфа и чистоиндукционной антенны. Эквивалентная схема реальной антенны подобна схеме, которая получается при параллельном включении  $RC$  — цепей, показанных на рис. 1, 1 и 1, 2.

К таким же выводам приводит уточнение теории индукционной антенны. Реальная индукционная антенна, например пластина Вильсона, действует в постоянном поле как приемник вертикального тока проводимости. Ее переходная характеристика отличается от характеристики рис. 1, 2а тем, что потенциал  $U$  приближается не к нулю, а к значению  $I/R$ , где  $I$  — сила вертикального тока. Оказывается, что индукционная антенна ведет себя в постоянном поле так же, как и коллекторная антенна. Для уточнения эквивалентной схемы рис. 1, 2 приходится добавить к ней  $RC$  — цепь, похожую на показанную на рис. 1, 1.

Второй тезис настоящей статьи — эквивалентные схемы и теории коллекторных и индукционных антенн совпадают друг с другом, различаясь лишь в количественных соотношениях.

**6. Параметры и переходная характеристика антенны.** Проводимостная действующая высота антенны  $h_R$  определяется как установившееся отношение —  $U/E$  в постоянном поле и индукционная действующая высота  $h_C$  — как это же отношение в высокочастотном поле. Действующие высоты зависят, помимо геометрии антенны, и от ее нагрузки.

Из возможных эквивалентных схем антенны наиболее проста и наглядна схема, изображенная на рис. 1, 3.  $C$  и  $R$  — собственная емкость и полное кажущееся сопротивление антенны. Свойства схемы не изменяются, если уменьшить сопротивление  $R$  и одновременно увеличить емкость  $C$  во столько же раз.

Вид переходной характеристики схемы рис. 1, 3 зависит от отношения действующих высот. Два примера представлены на рис. 1, 3а. Если кривая 1 изображает функцию —  $h_R E(t)$ , кривая 2 — функцию —  $h_C E(t)$ , то по рисунку  $h_R > h_C$ , что характерно для прибора Бенндорфа. Функция  $U(t)$  при этом изображается кривой 3. Начальный мгновенный скачок потенциала хорошо объясняет наблюдения, описанные в п. 3 настоящей статьи. Если кривая 1 изображает функцию —  $h_C E(t)$ , а кривая 2 — функцию —  $h_R E(t)$ , то  $h_C > h_R$ , что характерно для прибора Вильсона. Функция  $U(t)$  в этом случае изображается кривой 4. При  $h_C \rightarrow 0$  антенна приобретает свойства антенны Бенндорфа, при  $h_R \rightarrow 0$  — чистоиндукционной антенны.

Антенна с  $h_R > h_C$  хорошо передает постоянную составляющую напряженности поля и синусоидальные составляющие низкой частоты. В отличие от антенны Бенндорфа она передает (с некоторым ослаблением) и составляющие очень высокой частоты. Антенна с  $h_C > h_R$  имеет частотную характеристику с подъемом в области высоких частот.

**7. Уравновешивание антенны.** Антенну с  $h_C = h_R$  будем называть уравновешенной. Уравновешенная антенна обладает идеальной переходной характеристикой. Она одновременно безынерционна и пригодна для непрерывных наблюдений.

Проводимостную действующую высоту прибора Бенндорфа удобно регулировать перемещением коллектора вдоль стержня-носителя. При стандартном способе крепления коллектора к концу стержня  $h_R > h_C$ , и для уравновешивания антенны достаточно подобрать новое место крепления коллектора [1], [3]. Описанная процедура уменьшает чувствительность полемера. Для сохранения чувствительности следует

не изменять расположения коллектора и уравновесить прибор подключением дополнительной индукционной антенны.

Антенна с  $h_C > h_R$  уравновешивается подключением дополнительного коллектора.

При  $h_R > h_C$  имеется теоретическая возможность уравновесить антенну соответственно выбранным шунтирующим резистором, а при  $h_C > h_R$  — шунтирующим конденсатором. Применение шунтирующего резистора на практике недопустимо по причине нестабильности проводимостной действующей высоты шунтированной антенны.

Примером уравновешенной антенны служит бесколлекторная пассивная антенна Крозье [8]. Пассивная антенна чрезмерно чувствительна к конвективному току. Добавление к антенне Крозье коллектора с небольшой активностью устранило бы отмеченный недостаток и стабилизировало бы проводимостную действующую высоту.

**8. Генераторный полемер.** Генераторный полемер (электростатический флюксметр) можно рассматривать как автоматизированный прибор Вильсона, в котором электрометр заменен измерительным усилителем переменного тока.  $h_C$  антенны генераторного полемера — переменная величина, что обеспечивает параметрическую модуляцию и усиление мощности сигнала.

В обычных генераторных полемерах модулирование и детектирование сигнала приводит к появлению инерционности, зависящей от частоты модуляции. Избежать появления инерционности можно ценой значительного усложнения прибора [9]. Безынерционна также двухканальная система, состоящая из обычного генераторного полемера (датчик низких частот) и индукционной антенны (датчик высоких частот).

Уравновешивание антенны генераторного полемера целесообразно при измерениях в сильно ионизированной среде. Если  $h_R(t) \equiv h_C(t)$ , то прибор нечувствителен к проводимости среды.

**9. Уравнение антенны.** Уравнение напряжения антенны выводится из соотношения

$$\frac{dq}{dt} = -I, \quad (3)$$

где  $q$  — заряд антенны, а  $I$  — сила тока от антенны. Заряд зависит от потенциала  $U$  и напряженности  $E$  линейно

$$q = CU + Ch_C E. \quad (4)$$

Постоянная  $C$  — емкость антенны. Легко проверить, что постоянная  $h_C$  удовлетворяет определению индукционной действующей высоты антенны. Сила тока выражается аналогично

$$I = \frac{U}{R} + \frac{h_R E}{R} - I_0, \quad (5)$$

где  $I_0$  — сила конвективного тока к антенне. Символы  $R$  и  $h_R$  сохраняют прежний смысл.

Приравняв производную заряда (4) к силе тока (5) и сгруппировав слагаемые, получим общее уравнение

$$\frac{dU}{dt} + \left( \frac{1}{RC} + \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} \right) U = - \frac{h_R E}{RC} - \frac{1}{C} \frac{d(Ch_C E)}{dt} + \frac{I_0}{C}. \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает как приборы Бенндорфа и Вильсона, так и генераторные полемеры.

Для антенны с постоянными параметрами можно записать упрощенное уравнение

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{RC} = -\frac{h_R \dot{E}}{RC} - h_C \frac{dE}{dt} + \frac{I_0}{C}. \quad (7)$$

Это уравнение позволяет выразить функцию  $U(t)$  через  $E(t)$  или наоборот. В соответствующих формулах встречаются интегралы Дюамеля, описывающие экспоненциальное сглаживание во времени от  $t = -\infty$  до текущего момента. Решение уравнения антенны дает количественную оценку инерционности полемера при сложной функции  $E(t)$  и указывает способ «реставрации» истинного хода напряженности по записи неуравновешенного прибора. Реставрацию можно автоматизировать при помощи аналоговых схем, компенсирующих инерционность антенны. Отмеченные вопросы подробнее разобраны в [5].

### ВЫВОДЫ

1. Общепризнанная теория инерционности коллекторных полемеров [5—7] неточна, а уточненная теория осталась почти неизвестной.
2. Инерционность реакции антенны на изменение напряженности поля не совпадает с инерционностью при включении антенны.
3. Антенна любого электростатического полемера обладает одновременно свойствами как коллекторной, так и индукционной антенны и характеризуется двумя действующими высотами.
4. Инерционность реакции коллекторной антенны на изменение напряженности поля меньше, чем предсказывает теория Бенндорфа. Антенна с совпадающими действующими высотами совершенно безынерционна.
5. Коллекторные антенны, индукционные антенны и антенны генераторных полемеров описываются общей эквивалентной схемой и одним и тем же уравнением.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Grenet G. Sur la mesure des variations brusques du champ électrique. C. r., 67. Congr. Soc. savantes, Masson & C<sup>ie</sup>, Paris, 1934.
2. Grenet G. Sur la mesure du champ électrique terrestre et de ses variations. C. r. Acad. sci., 198, 10, 1934.
3. Lecolazet R. Sur la définition et la théorie des prises de potentiel en électricité atmosphérique. C. r. Acad. sci., 22, 6, 1946.
4. Kasemir H. W., Ruhnke L. H. Antenna problems of measurement of the air earth current. Recent Advances in Atmospheric Electricity. Pergamon Press, 1958.
5. Benndorf H. Zur Theorie luftelektrischer Registrierungen. I. Sitzungsber. Wien. Akad. Wiss., 11a, 118, 1909.
6. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. Гостехиздат, М., 1957.
7. Israel H. Atmosphärische Elektrizität, T. II. Geest & Portig K.—G. Leipzig, 1961.
8. Crozier W. D. Measuring atmospheric potential with passive antennas. J. Geophys. Res., 68, 18, 1963.
9. Smith L. G. An electric field meter with extended frequency range. Rev. Sci. Instr., 25, 5, 1954.