

УДК 621.396.67

О.С. Воропаев, Г.Г. Гошин

## Стенд для измерения амплитудно-фазовых распределений тока вдоль провода и исследования структуры электрического поля в околопроводном пространстве

Представлено описание разработанного экспериментального стенда для исследования амплитудно-фазовых распределений тока вдоль провода излучающей системы и структуры электрического поля в околопроводном пространстве в полунатурных условиях с учетом подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** амплитудно-фазовое распределение тока, излучающая структура, однопроводная линия, зонд.

Процесс разработки и решения ряда инженерных задач по проектированию антенной техники в настоящее время в значительной степени упрощен благодаря высокому уровню развития систем электродинамического проектирования, лежащих в основе программ компьютерного моделирования. Тем не менее возможности систем математического моделирования антенн и антенных систем не безграничны. Здесь, в первую очередь, следует указать на моделирование приземных антенн. Электрические параметры таких антенн, как известно, зависят не только от конструктивных, но и в значительной мере от электродинамических параметров подстилающей поверхности, учет которой, в ряде случаев, не поддается корректному математическому описанию. К тому же корректность результатов моделирования во многом зависит от правильности задания исходных данных, выбора математического аппарата, корректности использования самой системы моделирования. Проверку результатов моделирования и теоретических выводов рационально выполнять по результатам соответствующих экспериментов. Таким образом, эксперимент по-прежнему является важнейшим средством для получения значений эмпирических констант и функциональных зависимостей, проверки теоретических результатов, а также является самостоятельным методом исследования в тех случаях, когда решаемая задача не может быть сведена к аналитической форме или не может быть создана адекватная модель, в нужной степени отражающая физику реальных процессов.

При проектировании излучающих структур на основе однопроводных линий одним из важных этапов также является установление эффективного (энергетического) радиуса поверхностной волны и степени ее замедления в выбранных проводниках. Как правило, эти величины оцениваются по приближенным трансцендентным уравнениям [1] для проводников в свободном пространстве. Уточнение же этих величин для реальных условий наиболее целесообразно выполнять с помощью эксперимента путем исследования структуры электромагнитного поля (ЭМП) в околопроводном пространстве.

Пригодные для этой цели методы в литературе, например [2, 3], посвящаются применительно к фидерным линиям для измерения отношения  $U_{\min}/U_{\max}$  (отношения напряжения в узле  $U_{\min}$  к напряжению в пучности  $U_{\max}$ ) с целью определения коэффициента бегущей волны (КБВ) в тракте. О снятии распределения тока вдоль проводника излучающей структуры приводятся отрывочные сведения, которых недостаточно для материально-методической организации соответствующих экспериментов. Также дается лишь краткое упоминание о некоторых ключевых моментах [2], учет которых не позволяет считать получаемые экспериментальные данные достоверными.

Таким образом, в основу принципа действия разрабатываемой экспериментальной установки может быть положен принцип зондовых измерений, заключающийся во введении в интересующую точку пространства зонда, мало возмущающего первичное поле и фактически представляющего собой приемную антенну малых электрических размеров. В зависимости от электрической величины, подлежащей регистрации (ток, напряжение, напряженность электрического или магнитного поля), выбираются соответствующий тип и конструкция зонда. В технике излучения электромагнитных волн (ЭМВ) в отличие от техники направленно-локализованной передачи ЭМВ к выбору вида регистрируемой величины следует подходить более ответственно. Связано это с уязвимостью зоны измерений к паразитным излучениям.

Измерение величины тока проводимости в проводниках излучающей структуры является наиболее логичным, но не представляется возможным без нарушения целостности излучающей структуры, поскольку измерение тока выполняется последовательным включением измерительного элемента в соответствующую цепь. Так как понятие напряжения в традиционном определении в нашем случае не имеет смысла, то измерение тока возможно лишь косвенным методом посредством измерения напряженности электрического  $E$  или магнитного  $H$  поля. Известно, что измерение электрического поля осуществляется емкостным зондом, а измерение магнитного поля – индуктивным зондом.

Более практичными в изготовлении и использовании являются емкостные зонды, с помощью которых выполняется измерение напряжения путем измерения напряженности электрического поля  $E$ . Конструктивно такой зонд представляет собой миниатюрный штырь, который ориентируется вдоль силовых линий электрического поля и настраивается в резонанс с частотой возбуждающего тока. Важным условием для достоверных измерений поля таким зондом является качество заземления фидера зонда, которое выполняется обычно через подвижную каретку. При ненулевом сопротивлении заземляющего контакта возникают паразитные резонансы в фидере зонда, искажающие реальную картину исследуемого распределения, а в измерительную цепь проникают наводки от внешнего излучения.

Для возможности исследования картины поля над проводом данный вариант емкостного зонда не может быть использован по причинам отсутствия возможности заземления каретки зонда и необходимости использования достаточно длинного соединительного зондового кабеля. Кроме того, при исследовании приземных излучателей над подстилающей поверхностью с высокой проводимостью напряженность электрического поля в верхнем полупространстве может оказаться малой и недостаточной для точной регистрации. Выходом из этой ситуации является использование разработанного для этой цели аperiodического емкостного зонда, эквивалентная электрическая схема которого представлена на рис. 1.

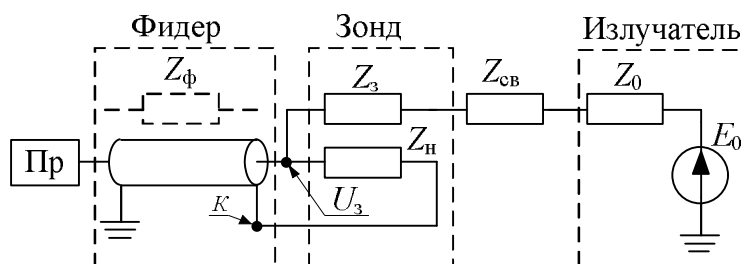


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема аperiodического емкостного зонда

На рисунке приняты следующие обозначения: Пр – приемник;  $Z_\phi$  – волновое сопротивление фидера;  $Z_н$  – сопротивление нагрузки;  $Z_з$  – эквивалентное сопротивление зонда;  $Z_{св}$  – эквивалентное сопротивление связи зонда с проводником;  $Z_0$  – волновое сопротивление проводника излучающей структуры;  $E_0$  – эквивалентная ЭДС излучателя;  $U_з$  – выходное напряжение зонда.

Принципиальным отличием от классического резонансного емкостного зонда является использование резистора  $Z_н$ , представляющего собой нагрузочное сопротивление «колпачкового» типа, согласованное с волновым сопротивлением соединительного фидера. При высокой степени согласования паразитные резонансы в фидере не возникают. При этом, также, отпадает необходимость в заземлении точки  $K$ , т.е. конец фидера с зондом может располагаться в свободном пространстве. «Колпачковая» конструкция нагрузки значительно уменьшает затекание тока с внешней стороны оплетки на внутреннюю. На рис. 2, а представлена конструкция «колпачковой» нагрузки, а на рис. 2, б – общий вид аperiodического зонда.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – центральная жила фидера; 2 – пайка; 3 – металлизация; 4 – резистивный слой; 5 – диэлектрик фидера; 6 – экран фидера; 7 – штыревой зонд; 8 – «колпачковая» нагрузка.

Благодаря согласованию в качестве регистратора сигнала может быть использован высокочувствительный измерительный радиоприемник или анализатор спектра, а в случае необходимости – и предварительный малошумящий усилитель (МШУ), включенный в

допустимой близости около зонда. Возникающая при этом необходимость в использовании высококачественного фазостабильного коаксиального кабеля для предотвращения искажений, вызываемых при его механических изгибах, особенно при фазовых измерениях, не является неустранимой трудностью. Необходимо отметить, что для возможности проведения исследований на стенде в ограниченном пространстве помещения, а также для устранения влияний оператора на первичное поле излучателя весь процесс должен проходить, по возможности, без участия оператора, т.е. должен быть автоматизирован.

С учетом сказанного выше была разработана экспериментальная установка для полунатурного исследования амплитудно-координатных распределений (АКР) и фазокоординатных распределений (ФКР) тока вдоль провода и структуры электрического поля в произвольных точках объема околопроводного пространства. Общий вид установки представлен на рис. 3.

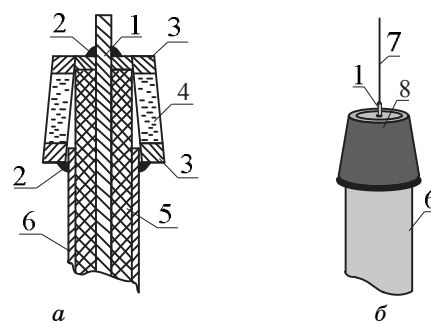


Рис. 2. Конструкция нагрузки – а; общий вид зонда – б)

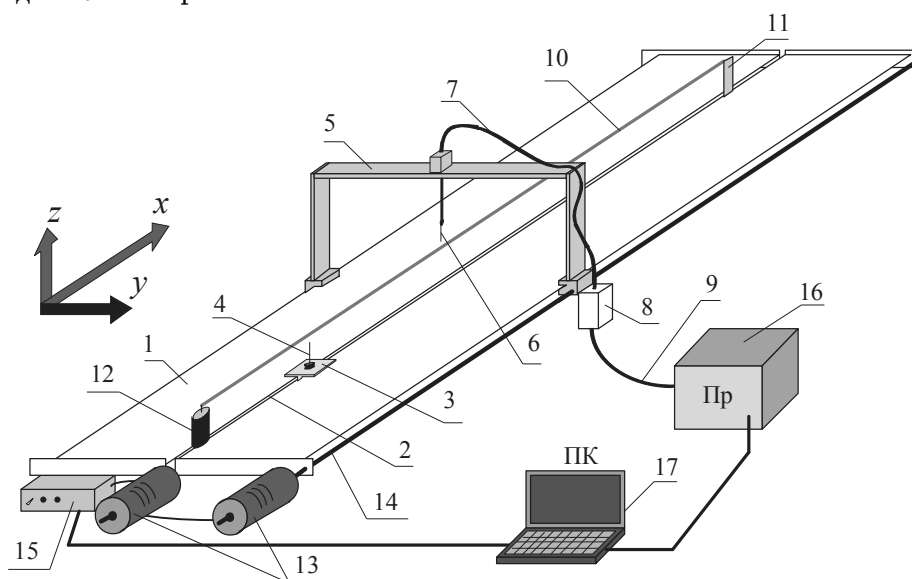


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

На нем обозначено: 1 – основание стенда в виде металлического листа («идеальная» земля); 2 – продольная щель для каретки зонда нижнего (по отношению к излучателю) полупространства; 3 – каретка зонда; 4 – зонд нижнего полупространства; 5 – диэлектрическая каретка зонда верхнего полупространства; 6 – зонд верхнего (по отношению к излучателю) полупространства; 7, 9 – соединительные фидеры зонда с усилителем и измерительным приемником; 8 – предварительный МШУ; 10 – излучающая структура в виде однопроводной линии; 11 – диэлектрический элемент крепления излучателя над землей; 12 – элемент возбуждения излучателя; 13 – электрические сервоприводы зондовых кареток; 14 – приводной шпиндель каретки; 15 – блок управления электромоторами сервоприводов; 16 – измерительный приемник; 17 – персональный компьютер.

В качестве измерительного приемника для снятия АКР и ФКР был использован измеритель разности фаз и амплитуд РФК2-18, а в качестве предварительного усилителя – малошумящий СВЧ-усилитель типа МАУ 1550-01 производства НПФ «Микран».

В качестве объекта для первичной апробации установки был выбран излучатель на основе однопроводной линии. Возбуждение провода типа МГТФ-0,05 (эквивалентный диаметр металлического проводника  $d_{\text{пр}} \approx 0,6$  мм, толщина фторопластовой изоляции  $t_{\text{из}} \approx 0,3$  мм) осуществлялось на частоте  $f_0 = 3$  ГГц ( $\lambda_0 = 10$  см) генератором Г4-80. Длина провода  $l_{\text{пр}} = 1800$  мм, высота подвеса  $h_a = 0,3\lambda_0$ . На свободном конце провода может

подключаться резистивная нагрузка с необходимым сопротивлением либо обеспечиваться холостой режим.

Проведем ориентировочный расчет амплитудно-фазового распределения напряжения вдоль линии при выбранных условиях для последующего сравнения с экспериментальными данными. Наиболее простой и целесообразной для данной задачи математической моделью является модель наложения двух бегущих гармонических волн напряжения, распространяющихся в длинной линии – падающей волны и волны, отраженной от нагрузки. Так, при коротком замыкании на свободном конце провода модуль коэффициента отражения для волны напряжения, как известно, равен  $|\Gamma|=1$ . Тогда волна, установившаяся вдоль провода, может быть описана выражением

$$U_{\text{пр}}(l') = U_0 \left[ e^{(l'-L_{\text{н}})\vec{\gamma}_0} - e^{(L_{\text{к}}-L_{\text{н}})\vec{\gamma}_0} \cdot e^{-(l'-L_{\text{к}})\vec{\gamma}_0} \right] e^{-i\varphi_0},$$

где  $\gamma = \alpha - ik$  – постоянная распространения вдоль линии;  $\alpha$  – коэффициент затухания вдоль линии;  $k = 2\pi/\lambda_{\text{д}}$  – волновое число;  $\lambda_{\text{д}}$  – длина волны вдоль линии;  $l'\vec{r}_0$  – радиус-вектор текущей точки на линии;  $L_{\text{н}}\vec{r}_0$ ,  $L_{\text{к}}\vec{r}_0$  – радиус-векторы начала и конца линии соответственно;  $\vec{r}_0$  – единичный радиус-вектор;  $\varphi_0$  – начальная фаза возбуждения;  $U_0$  – амплитуда возбуждения.

В случае холостого режима на свободном конце провода модуль коэффициента отражения равен  $|\Gamma|=-1$ . И тогда слагаемые в выражении для установившейся волны будут суммироваться. В обоих случаях потерями при распространении волны вдоль линии пренебрегаем, т.е.  $\alpha=0$ .

На рис. 4 и 5 представлены расчетные и экспериментально снятые кривые АКР и ФКР на различных участках провода. Условия физических экспериментов соответствуют условиям математических расчетов.

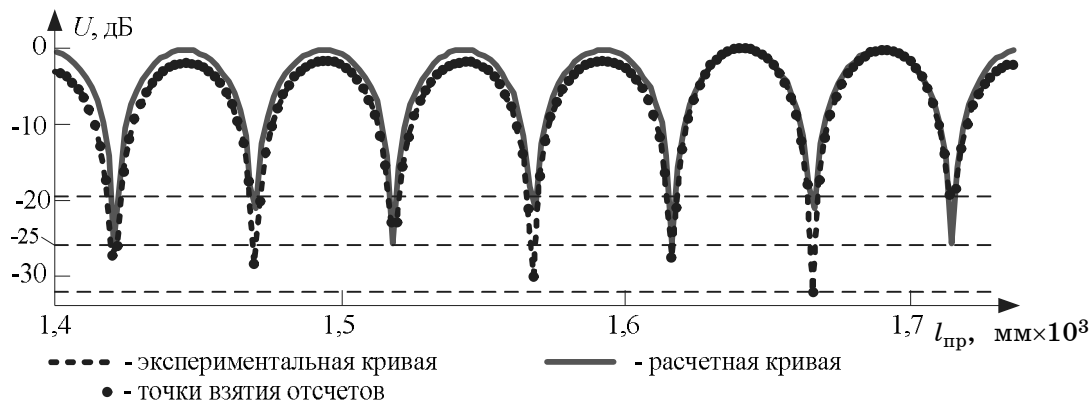


Рис. 4. Амплитудно-координатное распределение напряжения вдоль участка провода 1400–1736 мм

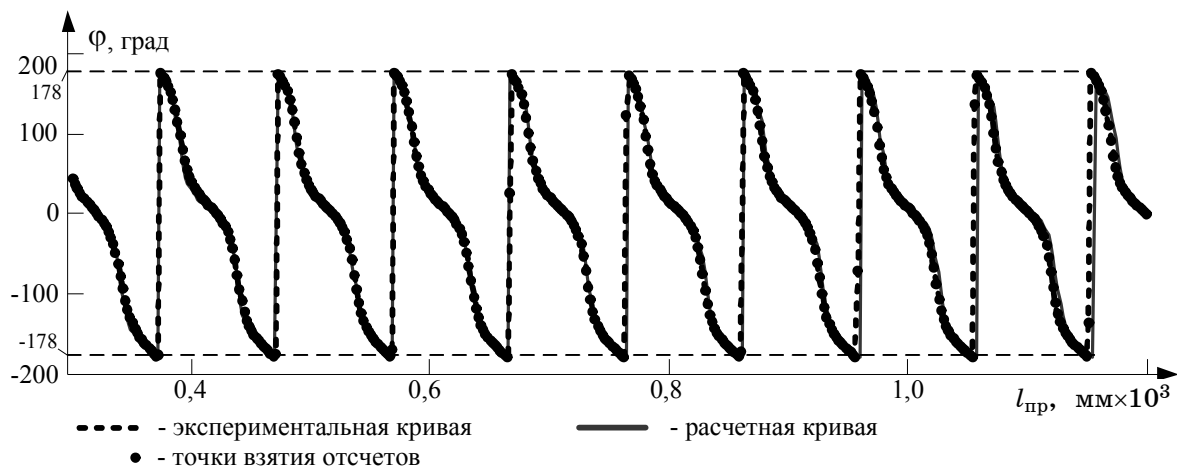


Рис. 5. Фазокоординатное распределение напряжения вдоль участка провода 300–1200 мм

Как видно из рисунков, совпадение расчета и эксперимента очень хорошее. Расхождение максимумов расчетной и экспериментальной кривой АКР можно объяснить излучением проводника, т.е. потерями, которые не были учтены при расчете. В среднем глубина регистрируемых минимумов по отношению к максимумам составляет около 25 дБ. Величина фазовых скачков составляет примерно  $360^\circ$ . Все это показывает, что характер установившейся волны нужно рассматривать как квазистоячий из-за наличия омических потерь и излучения.

Таким образом, разработанный стенд и методика измерений позволят при исследовании более сложных излучающих структур получаемые экспериментальные данные квалифицировать как достоверные, которые уже могут быть аппроксимированы математическими функциями для численного моделирования.

Для возможности проведения исследований над реальной землей в стенде предусмотрена возможность размещения всей измерительной части и излучателей над диэлектрической кюветой, заполняемой нужным типом грунта.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

#### *Литература*

1. Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи. – М.: Советское радио, 1964. – 600 с.
2. Харченко К.П., Бекетов В.И. Измерения и испытания при конструировании и регулировке радиолюбительских антенн. – М.: Связь, 1972. – 303 с.
3. Вайсфлор А. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах. – М.: Советское радио, 1961. – 424 с.

---

#### **Воропаев Олег Сергеевич**

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 70-15-18  
Эл. почта: olswor@mail.ru

#### **Гошин Геннадий Георгиевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 70-15-18  
Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Voropaev O.S., Goshin G.G.

#### **The test-bed for measurement of the amplitude-phase distribution of a current along wire and study of the electric field structure near wire space**

The developed experimental test-bed, which is intended for measurement of the amplitude-phase distributions of a current along radiating system wire and the electric field structure near wire space in seminatural conditions considering the underlying surface, is presented.

**Keywords:** amplitude-phase distribution of a current, radiating structure, single-wire line, probe.

---