

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Фатыхов Миннехан Абузарович

д-р физ.–мат. наук, профессор,
заведующий кафедрой общей и теоретической физики
ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный
педагогический университет им. М. Акмуллы»

Фатыхов Ленарт Миннеханович

ведущий специалист
ООО «РН–УфаНИПИнефть»
г. Уфа, Республика Башкортостан

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Аннотация: статья посвящена теоретическому исследованию коэффициента стоячей волны в коаксиальной линии, подключенной к диэлектрической нагрузке. Описан процесс последовательного отражения электромагнитных волн от нагрузки и входа длинной линии. Изучено распределение напряжения по линии во времени. Получена формула для коэффициента стоячей волны в линии без потерь.

В различных отраслях народного хозяйства весьма перспективны методы, основанные на использовании воздействия на рабочие среды электромагнитных полей высокой и сверхвысокой частоты [1–4]. Принципиальная схема применения их заключается в следующем. Рабочим средам от высокочастотного или сверхвысокочастотного источника с помощью электродов подводится электромагнитная энергия. Структурная схема может быть представлена в виде трех взаимосвязанных блоков: нагрузка (призобойная зона, пласт, трубопровод), передающая линия (оборудование скважины, радиочастотный кабель), источник энергии или генерирующее устройство. Их взаимодействие характеризуется соотношением ряда основных параметров, основополагающие из которых –

технологические, которые, в свою очередь, определяют электрические параметры генерирующего устройства и передающей линии. Все это определяется конечной целью технологического процесса: плавлением, возгонкой, растворением, интенсификацией химических реакций, увеличением дебита скважины и т.д. [3–5].

Для технологий, связанных с использованием электромагнитной энергии, весь технологический процесс характеризуется величиной сопротивления нагрузки и коэффициентом стоячей волны (КСВ) в передающей линии (эти величины комплексные), характером изменения этих величин во времени, определяемыми ростом температуры, фазовыми переходами, изменением степени влажности, содержанием полезного компонента. Окончательный результат исследования – определение необходимой плотности энергии в объеме рабочей среды для оптимизации технологического процесса. Следовательно, большое значение имеет определение мощности, вводимой в рабочую среду через токоведущий канал (в частности, коаксиальную линию, скважину) от источника электромагнитной энергии, т.е. от генератора. Между тем, в настоящее время не разработана методика расчета мощности электромагнитного поля, вводимой в рабочую среду, с учетом физических процессов, происходящих в токоведущем канале. Целью настоящей работы является изучение КСВ в коаксиальной линии передачи без потерь, связывающей генератор и нагрузку. Следует заметить, что данная задача решена для линии с потерями в работе [6].

Рассмотрим длинную линию без потерь, нагруженную на активные сопротивления

$Z_{\Gamma} = R_{\Gamma} \neq \rho$ и $Z_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} \neq \rho$ (рис. 1), на вход которой в начальный момент включается гармонический сигнал $\dot{E} = E e^{j\varphi_0 + j\omega t}$ (E – амплитуда электродвижущей силы источника (эдс), – начальная фаза эдс, индексы «Г» и «Н» обозначают генератор и нагрузка соответственно, – циклическая частота, – время).

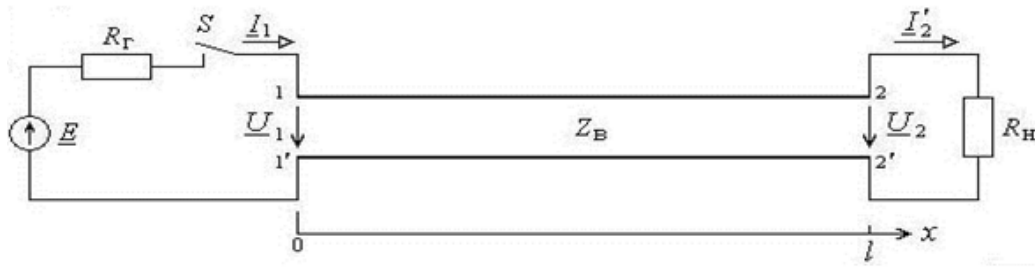


Рис. 1. Включение гармонической эдс в длинную линию без потерь, нагруженную на активные сопротивления

В момент включения эдс на входе длинной линии возникают исходные падающие напряжение и ток

$$\dot{U}_{1П}(0) = \dot{U}_1 = \frac{1-n_1}{2} \dot{E}, \quad \dot{I}_1(0) = \dot{I}_1 = \frac{1-n_1}{2\rho} \dot{E}.$$

Первая падающая волна вдоль линии распространяется по закону

$$\dot{U}_{1П}(x) = \dot{U}_1 e^{-j\beta x},$$

где β – фаза волны.

Первая падающая волна достигает конца линии через время τ , отражается от нагрузки с коэффициентом n_2 , и в линии появляется первая отражённая волна

$$\dot{U}_{1О}(x) = n_2 \dot{U}_{1П}(l) e^{-j\beta(x-l)} = n_2 \dot{U}_1 e^{-j\beta l} e^{j\beta(x-l)}$$

которая движется к началу длинной линии, являясь падающей волной для входных точек линии.

Ещё через некоторое время эта волна достигает начала длинной линии, отражается от входа и в линии появляется вторая падающая волна, движущаяся к концу длинной линии:

$$\dot{U}_{2П}(x) = n_1 \dot{U}_{1О}(0) e^{-j\beta x} = n_1 n_2 \dot{U}_1 e^{-j2\beta l} e^{-j\beta x}$$

В формуле (4) n_1 – коэффициент отражения волны от токоведущей линии.

Процесс последовательного отражения от нагрузки и входа длинной линии многократно повторяется.

Сгруппировав по отдельности падающие и отражённые волны, получим выражение для напряжения, изменяющегося во времени. Из него следует, что в

точках, где косинусоидальные множители максимальны и равны единице, амплитуды напряжений изменяются с расстоянием по закону

$$\begin{aligned} u(t_m, x) &= U_m = \frac{1-n_1}{2} E \{ [1 + n_1 n_2 + (n_1 n_2)^2 + (n_1 n_2)^3 + \dots] + \\ &+ |n_2| [1 + n_1 n_2 + (n_1 n_2)^2 + (n_1 n_2)^3 + \dots] \} = \\ &= \frac{(1-n_1)|n_2|}{2} E [1 + n_1 n_2 + (n_1 n_2)^2 + (n_1 n_2)^3 + \dots] \end{aligned}$$

Если n_1 и n_2 имеют одинаковые знаки, то $0 < n_1 n_2 < 1$. Падающие и отражённые волны образуют убывающие геометрические прогрессии со знаменателем $q = n_1 n_2$. В пределе, когда число членов прогрессии стремится к бесконечности, касательная к максимумам амплитуд может быть рассчитана по формуле

$$U_{m \max} = \frac{(1-n_1)|n_2|}{2(1-n_1 n_2)} E .$$

Одновременно имеет место вычитание отражённых волн от падающих, и минимальные значения амплитуды смешанных волн надо будет рассчитывать по формуле

$$U_{m \min} = \frac{(1-n_1)|n_2|}{2(1-n_1 n_2)} E .$$

Определяя максимальное и минимальное значения напряжения при $x=0$ (в силу формул (6) и (7)),

$$U_{\max} = \frac{(1-n_1)(1+|n_2|)}{2(1-n_1 n_2)} E , \quad U_{\min} = \frac{(1-n_1)(1-|n_2|)}{2(1-n_1 n_2)} E ,$$

и, используя определение КСВ [2], получим

$$КСВ = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1+|n_2|}{1-|n_2|} .$$

Как видно из данной формулы, значение КСВ в коаксиальной линии не зависит от параметра n_1 , а определяется лишь одним безразмерным параметром:

Приоритетные направления развития науки и образования

коэффициентом отражения от нагрузки n_2 .

В таблице 1 представлены результаты расчета КСВ в коаксиальной линии от этого безразмерного параметра.

Таблица 1

Зависимости коэффициента стоячей волны в коаксиальной линии от коэффициента отражения на границе «линия–нагрузка»

n_2	KCB
0	1
0,1	1,22
0,2	1,5
0,4	2,3
0,6	4
0,8	9
1	∞

Как видно из таблицы, КСВ изменяется в пределах от 1 (режим бегущей волны в линии) до бесконечности (режим стоячих волн).

Значения коэффициента стоячей волны необходимы для расчета мощности электромагнитного поля, вводимого в пласт [7, 8].

Список литературы

1. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ–энергетика. – М.: Наука, 2000. – С. 264.
2. Семенов Н.А. Техническая электродинамика: учеб. для вузов. – М.: Связь, 1973. – С. 480.
3. Фатыхов М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксиальной системе под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения// Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40, №5. – С. 802–809.
4. Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Экспериментальные исследования разложения газогидрата в трубе при сверхвысокочастотном электромагнитном воздействии //Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. № 4. – С. 612–617.
5. Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я., Фатыхов Л.М.
6. Предотвращение отложения парафина, солей и гидратов //
7. Нефтепромысловое дело. – 2007. – № 7. – С. 48–51.

8. Фатыхов М.А., Фатыхов Л.М. Исследование коэффициента стоячей волны в высокочастотной токоведущей линии с потерями //В мире научных открытий, 2013, №6 (Математика. Механика. Информатика). – С. 272–282.

9. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Кузнецов О.Л. Исследование электромагнитно–акустического воздействия на распределение температуры в нефтеводонасыщенной горной породе //Изв. Вузов: Нефть и газ. – 1981. – № 3.– С 36–41.

10. Фатыхов М.А. Комбинированные методы воздействия на нефтяные пласты на основе электромагнитных эффектов. – Уфа: Изд–во БГПУ, 2010. – 122 с.