

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

С.Ф.Медников, М.Л. Нечаевский

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В [5] описан электромагнитный датчик перемещений, первичный преобразователь которого содержит однослойную измерительную обмотку, равномерно распределенную вдоль трубчатого сердечника и помещенную в стальной корпус. Подвижный элемент – алюминиевая трубка – перемещается коаксиально корпусу датчика.

Использование приближенных формул для расчета протяженных цилиндрических катушек с сердечником (см., например [4]) дает удовлетворительные по точности результаты лишь на ограниченной длине катушки и приводят к значительным погрешностям при расчете ее параметров в начале и конце диапазона измерений. Поскольку катушка наматывается в один слой непосредственно на ферромагнитный сердечник, то значительное влияние на вид функции преобразования оказывают емкостные связи между обмоткой и сердечником, а также взаимная индуктивность между витками катушки по ее длине. Кроме того, необходимо учитывать экранирующее воздействие корпуса и подвижного элемента датчика на измерительную обмотку и друг на друга.

При значительном диапазоне измерений (десятки и сотни мм) электромагнитная система датчика имеет распределенный характер, поэтому в качестве ее модели целесообразно использовать электрическую линию, параметры которой характеризуют все компоненты импеданса измерительной обмотки. Это отражает специфику датчика перемещений: зависимость выходного сигнала от поточкораспределения в обмотке и влияние емкостных паразитных связей между ее витками и на сердечник (землю), что особенно важно в случае прямоугольной несущей.

Заметим, что когда говорят о цепях с распределенными параметрами, то обычно имеют в виду линии передачи электрической энергии на большие расстояния, телефонные и телеграфные воздушные и кабельные линии и т.п. В тоже время такого рода цепи возникают и тогда, когда «линий» в буквальном смысле слова нет. Так, достаточно длинная индуктивная катушка фактически представляет собой цепь с распределенными параметрами [2].

На рис. 1 показана элементарная ячейка электрической линии, которая служит схемой замещения бесконечно малого участка измерительной обмотки длиной  $dx$ , где координата  $x$  отсчитывается от одного из выводов.

Погонные (на единицу длины) параметры линии предполагаются постоянными:  $R$  и  $L$  – сопротивление и индуктивность обмотки,  $C_m$  – межвитковая емкость,  $G$  – проводимость изоляции провода,  $C$  – емкость между витками обмотки и ее сердечником, который служит обратным проводом электрической линии (один из выводов обмотки замкнут на сердечник). Эквивалентные комплексные амплитуды тока и напряжения в схеме являются функциями координаты  $x$ .

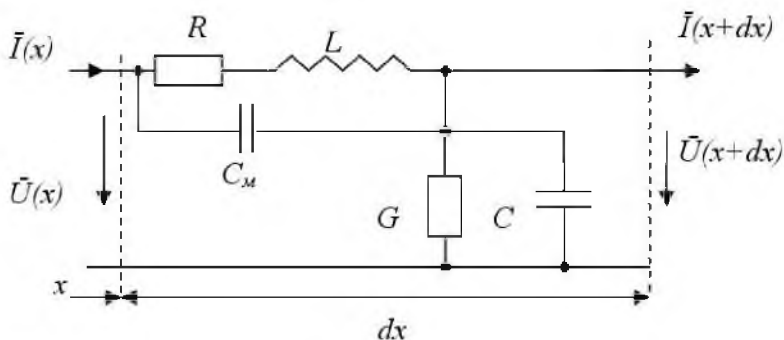


Рис. 1. Элементарная ячейка эквивалентной электрической линии

Согласно законам Кирхгофа для данной схемы на распределения тока и напряжения по длине линии описываются дифференциальным уравнением вида

$$(1 + j\omega C_m Z) F'(x) - ZY F(x) = 0, \quad Z = R + j\omega L, \quad Y = G + j\omega C, \quad (1)$$

общее решение которого

$$F(x) = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x}, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий,  $\gamma = \alpha + j\beta$  – корень характеристического уравнения

$$\gamma^2 - \frac{ZY}{1 + j\omega C_m Z} = 0, \quad (3)$$

откуда с учетом (1)

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{p^2 + q^2} + q}, \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{p^2 + q^2} - q};$$

$$p = \frac{(RG - \omega^2 CL)(1 - \omega^2 C_m L) + \omega^2 C_m R(CR + LG)}{(1 - \omega^2 C_m L)^2 + \omega^2 C_m^2 R^2}; \quad (4)$$

$$q = \frac{\omega(CR + LG)(1 - \omega^2 C_M L) - \omega C_M R(RG - \omega^2 CL)}{(1 - \omega^2 C_M L)^2 + \omega^2 C_M^2 R^2}$$

Параметр  $\beta$  имеет физический смысл фазовой скорости пространственной волны (бегущей вдоль оси обмотки) [1,2], длина которой равна

$$\lambda = 2\pi / \beta. \quad (5)$$

Полагая частоту питания обмотки  $f = 2, 4, 8, 16, 32$  КГц и подставляя в (4), (5) числовые значения параметров, характерные для датчиков с диапазонами измерения от 100 до 630 мм, находим длину волны  $\lambda$  (табл. 1). Как видно из таблицы, при частотах от 2 до 32 кГц длина волны значительно превосходит длину реальных датчиков. Это указывает на то, что при рассмотрении измерительной обмотки как электрической линии волновые процессы в ней можно не учитывать.

Таблица 1

	Длина обмотки (мм)	100	160	200	250	300	400	630
f (Гц)	Длина волны (м)							
2000	$\lambda$	11,68	14,77	16,51	18,46	20,22	23,35	30,87
4000	$\lambda$	7,39	9,34	10,45	11,68	12,79	14,77	19,51
8000	$\lambda$	4,80	6,07	6,78	7,58	8,31	9,59	12,66
16000	$\lambda$	3,19	4,04	4,52	5,05	5,53	6,39	8,43
32000	$\lambda$	2,03	2,56	2,86	3,20	3,51	4,05	5,34

Значения эквивалентной емкости  $C_u$  измерительной обмотки без экрана и соответственно погонной емкости  $C = C_u / l$  в (3) определялись с использованием методики, описанной в [3]:

$$C_u = \text{Re} \left[ \frac{1}{j\omega} \left( \sqrt{\frac{1}{X_c Z_{u0}}} \frac{\text{ctg} Z_{u0}}{X_c} - \frac{1}{Z_{u0}} \right) \right], \quad X_c = \frac{2 \ln(2l_n / d_n) - 1}{j\omega \pi \epsilon \epsilon_0 l_n}, \quad (6)$$

где  $l_n$  и  $d_n$  – соответственно длина и диаметр провода измерительной обмотки,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость его изоляции. Собственный импеданс измерительной обмотки без экрана  $Z_{u0}$  и индуктивная компонента  $X_c$ , вносимая экранирующим воздействием корпуса, вычисляются по формулам, приведенным в [7].

В табл. 2 приведены значения эквивалентной емкости измерительной обмотки на сердечник.

Таблица 2

Длина обмотки	140	200	240	290	340	450	680
С (нФ)	51,4 нФ	73,4 нФ	88,1 нФ	106 нФ	125 нФ	165 нФ	250 нФ

Как показано в [5,6], положение подвижного элемента линейно связано с изменением комплексного входного импеданса измерительной обмотки, для определения которого удобно использовать входное сопротивление эквивалентной линии  $Z_{ex}(x) = \dot{U}(x) / \dot{I}(x)$  в произвольном сечении с координатой  $x$ . Функция  $Z_{ex}(x)$  удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$Z'_{ex} - \frac{Y}{1 + j\omega C_m Z} Z_{ex}^2 + Z_{ex} = 0, \quad (7)$$

решение которого при граничном условии  $Z_{ex}(l) = Z_l$

$$Z_{ex}(x) = \frac{Z_l - Z_0 \sqrt{1 + j\omega C_m Z} \operatorname{th} \gamma(x-l)}{1 - \frac{Z_l \sqrt{1 + j\omega C_m Z}}{Z_0} \operatorname{th} \gamma(x-l)}, \quad (8)$$

где  $\gamma = \sqrt{ZY / (1 + j\omega C_m Z)}$  - постоянная распространения,

$Z_0 = \sqrt{Z/Y}$  - волновое сопротивление.

Входной импеданс всей линии длиной  $l$  получается из (8) при  $x = 0$ :

$$Z_{ex}(0) = Z_{exl} = \frac{Z_l + Z_0 \sqrt{1 + j\omega C_m Z} \operatorname{th} \gamma l}{1 + \frac{Z_l \sqrt{1 + j\omega C_m Z}}{Z_0} \operatorname{th} \gamma l}. \quad (9)$$

С учетом подвижного экрана схема замещения электромагнитной системы датчика может быть представлена в виде каскадного соединения двух электрических линий переменной длины, соответствующих экранированной и неэкранированной частям обмотки (рис.2).

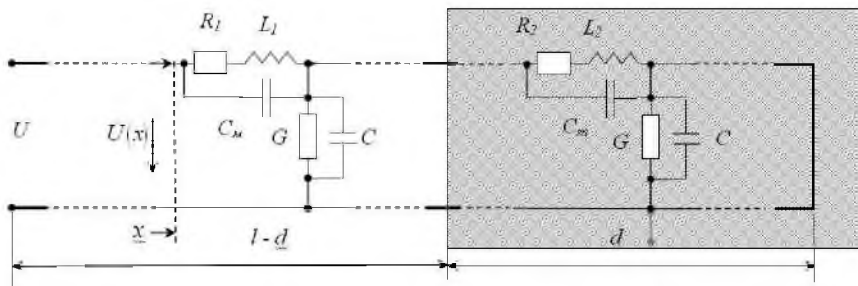


Рис. 2. Схема замещения электромагнитной системы датчика как эквивалентной электрической линии

Датчик конструктивно выполнен так, что выводы измерительной обмотки находятся на конце, противоположном экрану, поэтому экранированную часть обмотки можно рассматривать как короткозамкнутую линию ( $Z_1 = 0$ ) с переменной длиной  $d$ , входной импеданс которой определяется выражением (9) при  $l = d$  и  $Z = Z_{u2} / d$ , где  $Z_{u2}$  - эквивалентный импеданс экранированной части обмотки:

$$Z_{ex2} = Z_{02} \sqrt{1 + j\omega C_M Z_{u2} / d} \operatorname{th} \gamma_2 d, \\ Z_{02} = \sqrt{Z_{u2} / d Y}, \quad \gamma_2 = \sqrt{Z_{u2} / Y d}. \quad (10)$$

Импеданс  $Z_{u2}$  определяется на основе методики, изложенной в [7] и учитывающей электромагнитное взаимодействие подвижного экрана, корпуса и измерительной обмотки датчика.

Неэкранированную часть обмотки можно рассматривать как линию переменной длины  $l-d$ , нагруженную на входной импеданс экранированной части:  $Z_{l1} = Z_{ex2}$ . Входной импеданс этой части и соответственно всей электромагнитной системы “измерительная обмотка - экран” определяется из (8) при замене  $l$  на  $l-d$  и  $Z = Z_{u1} / (l-d)$ , где  $Z_{u1}$  - эквивалентный импеданс неэкранированной части обмотки, который находится аналогично  $Z_{u2}$ . С учетом (10):

$$Z_{ex}(d) = \frac{Z_{02} \sqrt{1 + j\omega C_M Z_{u2} / d} \operatorname{th} \gamma_2 d + Z_{01} \sqrt{1 + j\omega C_M Z_{u1} / (l-d)} \operatorname{th} \gamma_1 (l-d)}{1 + \frac{Z_{02} \sqrt{1 + j\omega C_M Z_{u2} / d} \operatorname{th} \gamma_2 d \sqrt{1 + j\omega C_M Z_{u1} / (l-d)}}{Z_{01} \operatorname{th} \gamma_1 (l-d)}}, \quad (11) \\ Z_{01} = \sqrt{Z_{u1} / (l-d) Y}, \quad \gamma_1 = \sqrt{Z_{u1} Y / (l-d)}.$$

### Список использованных источников

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа, 1973.- 752с.
2. Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах. – М.: Энергия, 1973.- 440с.
3. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергия, 1970.- 415 с.
5. Конюхов Н.Е., Медников С.Ф., Нечаевский М.Л. Датчик положения для гидравлических цилиндров.//Датчики и системы. 2003, №1.- с.36-38.
6. Медников С.Ф. Схема замещения для индуктивных преобразователей перемещения. - Вестник СГАУ, 2003, выпуск 8, с. 63-66.
7. Loos H. R. Systemtechnik induktiver Weg- und Kraftaufnehmer, 1992, 250 s.

## СПАСАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЕРХОВОГО РАБОЧЕГО БУРОВОЙ ВЫШКИ

В.А. Зубарев

Приволжско-Уральский региональный центр МЧС России

Из статистических исследований промышленных, литературных и патентных материалов следует, что отсутствуют методы и средства спасения верхового рабочего при внезапном фонтанировании и пожаре на буровой вышке.

При явлении открытого фонтанирования нефти или газа на устье скважины буровой обычно следует воспламенение продукта, т.е. пожар, и завал вышки, в то время как верховой рабочий со своей площадки должен спуститься с вышки по трапу (лестнице) против встречного потока фонтана, а возможно уже и факела, что сомнительно гарантирует ему безопасность и спасение.

Отсюда следует, что тема спасения верхового рабочего буровой вышки является актуальной для нефтяной и газовой промышленности. Возникает необходимость разработки способов и средств быстрой и автоматической эвакуации верхового рабочего с буровой вышки на безопасное расстояние от ее основания.

Существует ряд вариантов спасательных устройств, для верхового рабочего буровой вышки, [1,2,3].