

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ДЛИННОЙ ЛИНИИ БЕЗ ПОТЕРЬ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЕЕ НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

В. Д. КЛЕМЕНТЬЕВ

Для наглядного представления энергетической стороны процесса включения длинной линии без потерь на постоянное напряжение можно воспользоваться описываемыми ниже диаграммами.

Рассмотрим построение диаграмм для следующих часто встречающихся в практике случаев:

1. Включение линии, разомкнутой на приемном конце (холостой ход).
2. Включение короткозамкнутой линии.
3. Включение линии, нагруженной на активное сопротивление.

1. Включение линии, разомкнутой на приемном конце

Построение энергетической диаграммы для этого случая производим подробно.

Известно, что в случае включения длинной линии без потерь на постоянное напряжение U неустановившийся процесс длится бесконечно долго и носит циклический характер с продолжительностью цикла:

$$T = 4\tau = \frac{4l}{v}, \quad (1)$$

где l — длина линии, v — скорость распространения электромагнитной энергии.

Каждый цикл состоит из четырех стадий.

Запас энергии во всей линии для моментов времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$ характеризуется данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1
Общий запас энергии в линии, открытой на конце

Время	Запас магнитной энергии	Запас электрической энергии	Общий запас энергии
0	0	0	0
τ	$\frac{L_0 l i_0^2}{2} = W_1$	$\frac{C_0 l U_0^2}{2} = W_1$	$2 W_1$
2τ	0	$\frac{C_0 l (2 U_0)^2}{2} = 4 W_1$	$4 W_1$
3τ	$\frac{L_0 l i_0^2}{2} = W_1$	$\frac{C_0 l U_0^2}{2} = W_1$	$2 W_1$
4τ	0	0	0

Ради краткости введе значение

$$W_1 = \frac{L_0 l i_0^2}{2} = \frac{C_0 l U_0^2}{2}, \quad (2)$$

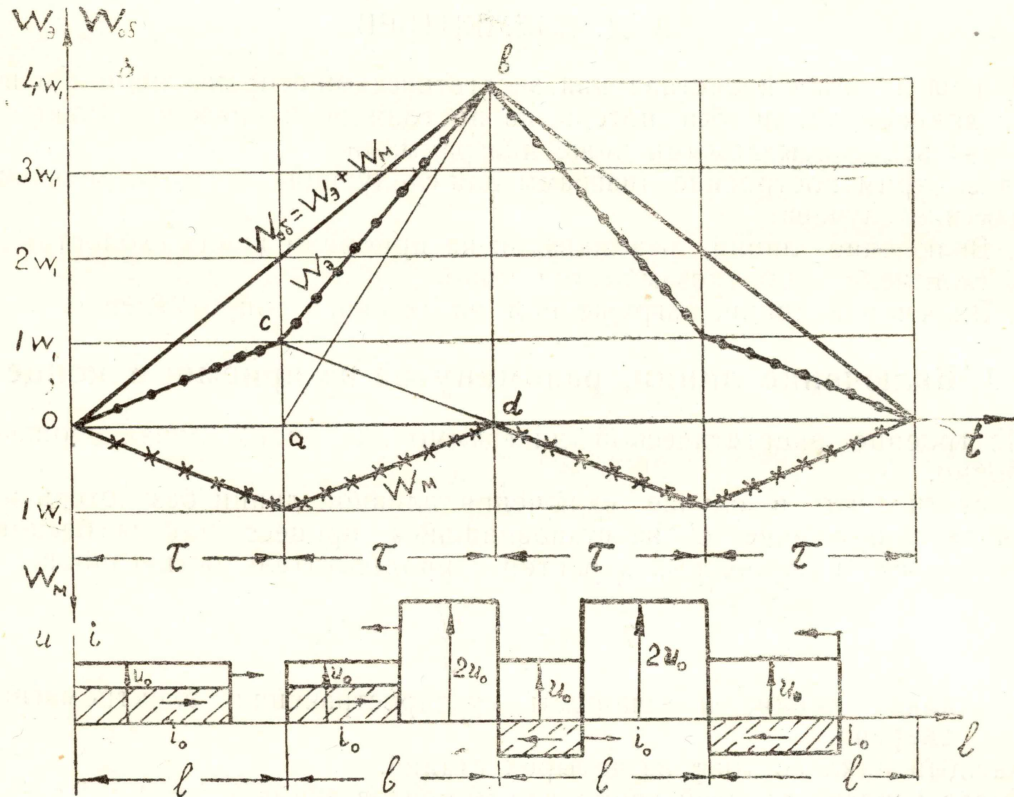
где L_0 — индуктивность на единицу длины линии,

C_0 — емкость на единицу длины линии,

l — длина линии,

U_0, i_0 — величины напряжения и тока бегущей волны.

Справедливость приведенных в табл. 1 выражений легко усматривается из фиг. 1, где для всех четырех стадий процесса представлено движение волн тока и напряжения вдоль линии.



Фиг. 1

Построение энергетической диаграммы производим следующим образом. Выше оси абсцисс откладываем величину одного вида энергии (например, энергии электрического поля), а ниже — другого вида энергии (например, энергии магнитного поля). Общий запас энергии $W_{об} = W_3 + W_m$ можно откладывать в любую сторону.

Данные таблицы на фиг. 1 отложены для значений времени:

$$\tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau.$$

За время каждой стадии процесса запас энергии W_3 и W_m меняется по линейному закону, так как

$$t = \frac{l}{v} \text{ и } l = vt,$$

и поэтому

$$W_m(t) = \frac{L_0 l i_0^2}{2} = \frac{L_0 l t i_0^2}{2} = K_1 t$$

$$W_s(t) = \frac{C_0 l U_0^2}{2} = \frac{C_0 v t U_0^2}{2} = K_2 t.$$

Изменение запаса энергии электрического и магнитного полей в зависимости от времени указано в табл. 2.

Таблица 2

Изменение запаса энергии линии, открытой на конце

Стадии цикла	Изменение W_m в течение стадии	Изменение W_s в течение стадии
1	$\frac{L_0 v t i_0^2}{2}$	$\frac{C_0 v t U_0^2}{2}$
2	$W_1 - \frac{L_0 v t i_0^2}{2}$	$W_1 + \frac{C_0 v t (2 U_0)^2}{2} - \frac{C_0 v t U_0^2}{2} = W_1 + \frac{3 C_0 v t U_0^2}{2}$
3	$\frac{L_0 v t i_0^2}{2}$	$4 W_1 - \frac{3 C_0 v t U_0^2}{2}$
4	$W_1 - \frac{L_0 v t i_0^2}{2}$	$W_1 - \frac{C_0 v t U_0^2}{2}$

Примечание. Отсчет времени ведется от начала каждой стадии. На основании приведенных выражений построена диаграмма (фиг. 1), на фигуре, кроме того, приведены графики распределения тока и напряжения вдоль линии.

Для второй стадии процесса член $\frac{C_0 v t (2 U_0)^2}{2}$, соответствующий отраженной волне напряжения 2, изображен линией ab , а член $\frac{C_0 v t U_0^2}{2}$, соответствующий падающей волне напряжения U , изображен линией cd .

Таким образом, предлагаемая диаграмма очень просто строится и дает ясное представление о запасе во всей линии как энергии электрического поля, а также общего запаса энергии для любого момента времени.

Из диаграммы, в частности, видно направление потока энергии: энергия в течение первой половины цикла отбирается от генератора равномерно $\left(\frac{d W_{об}}{dt} = \text{const} \right)$, а в течение второй половины цикла — возвращается генератору $\left(\frac{d W_{об}}{dt} = - \text{const} \right)$.

2. Включение короткозамкнутой линии на постоянное напряжение

Указанным выше способом строится энергетическая диаграмма и для случая включения короткозамкнутой линии на постоянное напряжение.

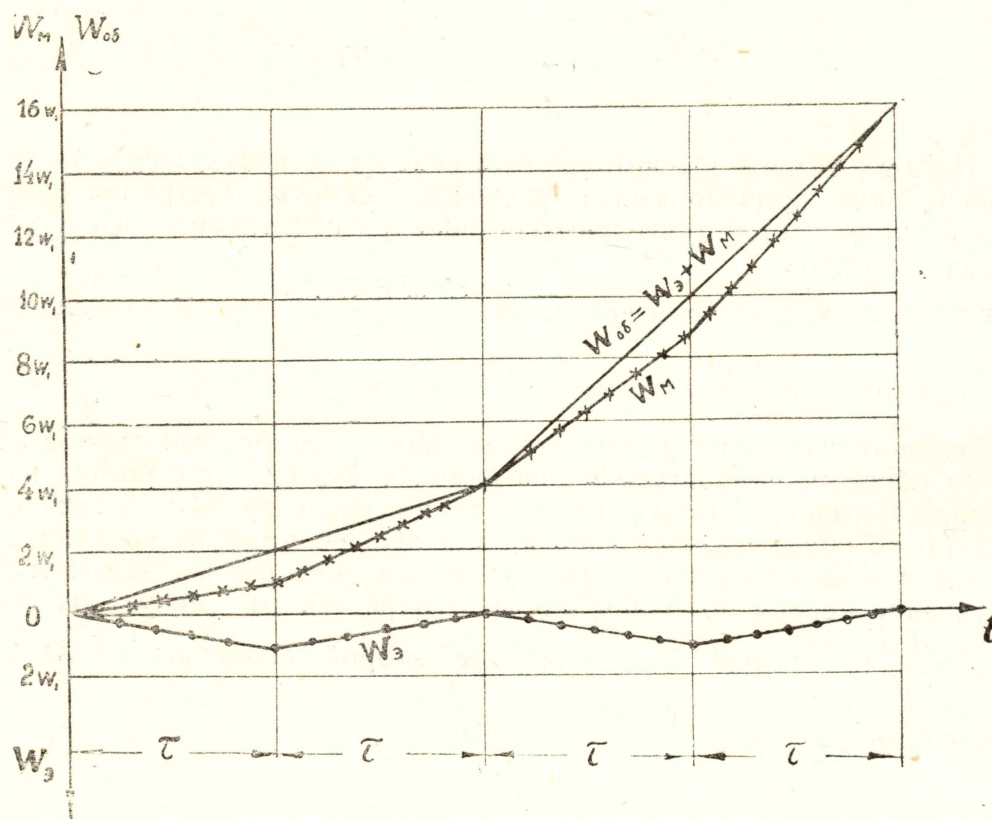
Диаграмма строится на основании данных, приведенных в табл. 3, в которой также введено обозначение $W_1 = \frac{C_0 l U_0^2}{2} = \frac{L_0 l i_0^2}{2}$.

Общий запас энергии в короткозамкнутой линии

Таблица 3

Время t	W_M	W_∂	$W_{0\partial} = W_M + W_\partial$
0	0	0	0
τ	W_1	W_1	$2 W_1$
2τ	$\frac{L_0 l (2 i_0)^2}{2} = 4 W_1$	0	$4 W_1$
3τ	$\frac{L_0 l (3 i_0)^2}{2} = 9 W_1$	W_1	$10 W_1$
4τ	$\frac{L_0 l (4 i_0)^2}{2} = 16 W_1$	0	$16 W_1$

Процесс в целом не имеет циклического характера. Циклически изменяется только запас энергии электрического поля. Запас энергии магнитного поля возрастает непрерывно.



Фиг. 2

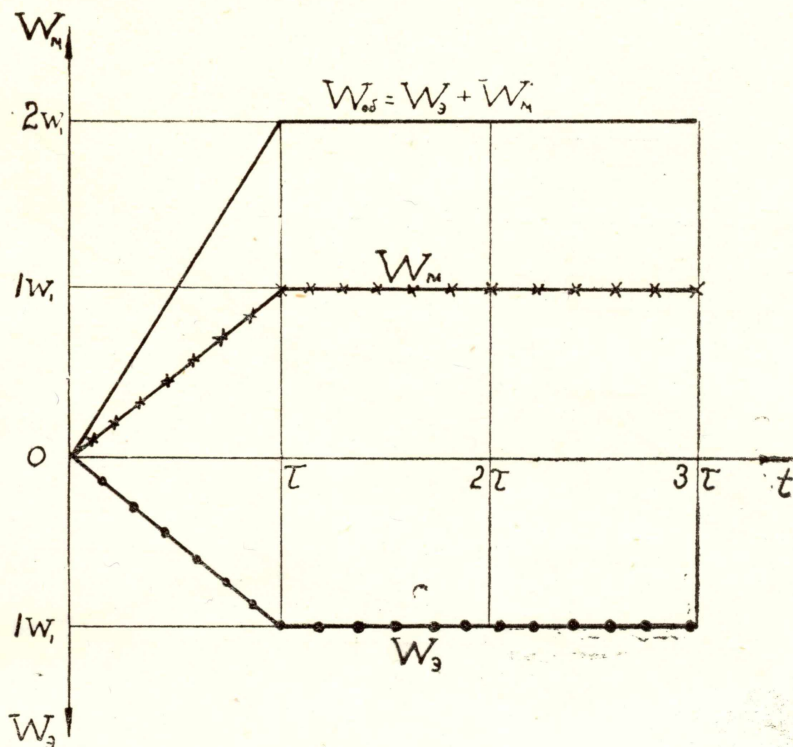
Потребление энергии от генератора также непрерывно возрастает. Все это видно из построенной диаграммы (фиг. 2).

3. Включение линии с активной нагрузкой на конце

Пользуясь указанным методом, можно построить энергетические диаграммы для включения линии с активной нагрузкой на конце.

Рассмотрим два случая: 1) $R_2 = Z_k$; 2) $R_2 \neq Z_k$

Энергетическая диаграмма будет иметь вид, показанный на фиг. 3.



2) Случай $R_2 \neq Z_\lambda$.

Возьмем режим, когда $R_2 = \frac{1}{3} Z_0$, т. е. коэффициент отражения

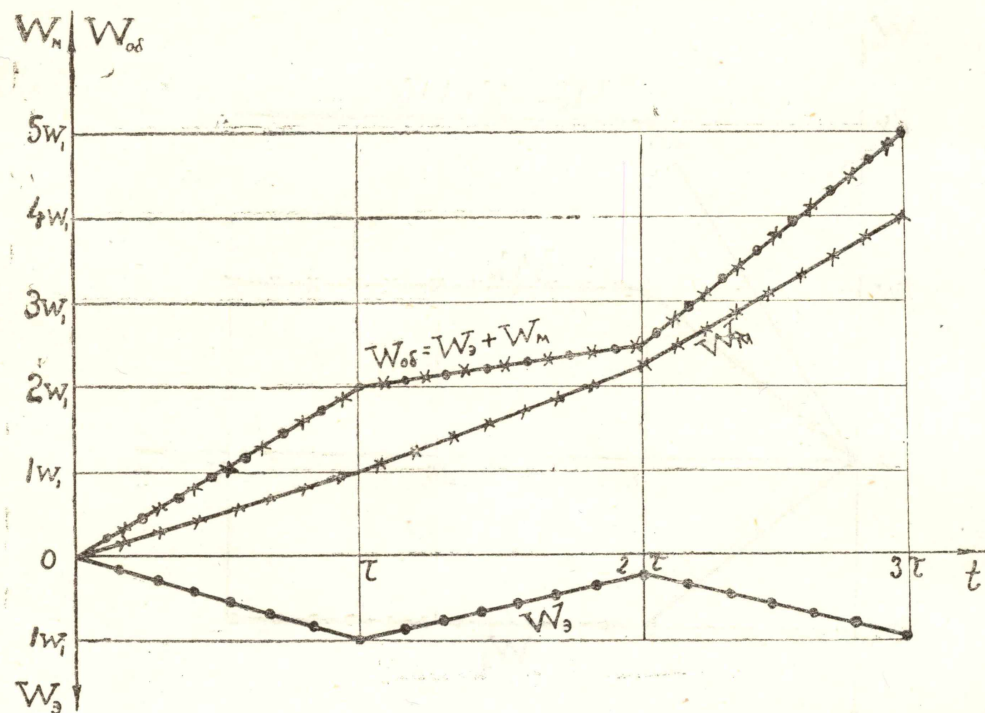
$$n = \frac{R_2 - Z_\lambda}{R_2 + Z_\lambda} = -\frac{1}{2}.$$

Диаграмма строится на основании данных табл. 4, которая составлена согласно графикам распространения волн тока и напряжения для принятого $n = -\frac{1}{2}$.

Общий запас энергии в линии с активной нагрузкой на конце

Время t	W_M	W_9	$W_{од} = W_M + W_9$
0	0	0	0
τ	$\frac{L_0 l i_0^2}{2} = W_1$	$\frac{C_0 l U_0^2}{2} = W_1$	$2 W_1$
2τ	$\frac{L_0 l (1,5 i_0)^2}{2} = 2,25 W_1$	$\frac{C_0 l (0,5 U_0)^2}{2} = 0,25 W_1$	$2,5 W_1$
3τ	$\frac{L_0 l (2 i_0)^2}{2} = 4 W_1$	$\frac{C_0 l U_0^2}{2} = W_1$	$5 W_1$
∞	$9 W_1$	W_1	$10 W_1$

При $t = \infty$ $W_M = 9W_1$, так как $I_{уст} = 3i_0$
 и $W_3 = W_1$, так как $U_{уст} = U_0$.
 Диаграмма будет иметь такой вид.



Фиг. 4

Как видно, процесс длится теоретически бесконечно долго и диаграмма может быть построена для любого числа циклов.

Для других значений величины нагрузки энергетическая диаграмма строится точно таким же образом.