© В.Н. Анисимов, О.Л. Дудченко, 2008

УДК 621.3.013

В.Н. Анисимов, О.Л. Дудченко

К ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ПРИ КОММУТАЦИИ ИДЕАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

В теории поля пользуются понятием магнитного диполя, который обладает магнитным моментом $p_м = q_м \bar{e}$, где $q_м$ – магнитный заряд. Виток с током *i*, охватывающий площадь *S* также обладает магнитным моментом $p_м = iS$. Таким образом, магнитный диполь можно рассматривать как расчетный эквивалент витка с током, если равны их магнитные моменты, т. е. $q_м \bar{e} = iS$.

Излучение энергии рамки с током можно в расчетном отношении представить как излучение магнитного диполя.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа

$$dH = \frac{J}{4\pi}\frac{[rdl]}{r^3} = \frac{J}{4\pi}\frac{dl\sin\alpha}{r^2}.$$

Поле в середине круглого витка радиуса *R*, по которому течет ток *J*, равно $H = \frac{J}{2R}$, $dl = Rd\varphi$,

$$\int dl = 2\pi R, H = \frac{J2\pi R}{4\pi R^2} = \frac{J}{2R}.$$

Поле на оси витка в точке, отстоящей на расстоянии *x* от его центра, равно

$$H_a = H_{centr}\sin^3\alpha = H_{centr}\frac{R^3}{\left(R^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{JR^2}{2\left(R^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}},$$

где $\sin^2\alpha$ принимается за счет увеличения расстояния и $\sin\alpha$ за счет правила параллелограмма при сложении векторов.

Схема диполя представлена на рис. 1.

Рассмотрим эквивалентную схему, которая в первом приближении может моделировать реальный электромагнитный процесс, создаваемый маг-нитным диполем (рис. 2). Этот диполь расположен например на земной поверхности с относительной магнитной проницаемостью μ.

Параметры этого диполя могут быть получены ориентировочно так:

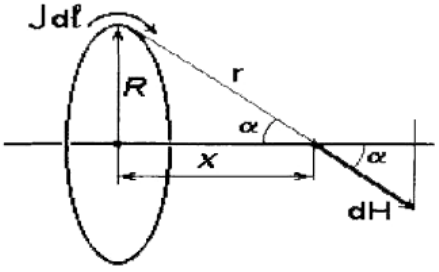

Рис. 1. Схема диполя

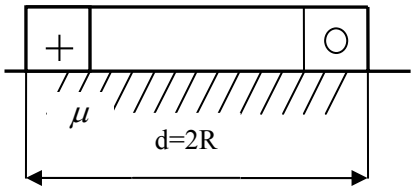

Рис. 2

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l} \approx 0{,}5 \div 0{,}12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где l – физическая длина.

Преобразование электрической энергии в тепло можно представить электрическим сопротивлением и для этих размеров магнитного диполя оно составит $R \approx 0{,}5 \div 1$ Ом.

Таким образом, эквивалентная схе-ма может быть представлена следующим образом (рис. 3).

В момент времени t = 0 проис-ходит коммутация, идеальная катушка подключается к источнику напряжения бесконечно большой мощности. Так как ток в такой цепи не может изменяться скачком и катушка представляет собой в момент времени t = 0 разрыв (холостой ход), то всё напряжение источника U будет приложено к зажимам катушки L и таким образом:

$$U_L = U = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Проинтегрируем полученное выражение:

$$di = \int \frac{U}{L} \cdot dt \rightarrow i = \frac{U}{L} \cdot t$$

Таким образом, ток в цепи будет нарастать линейному закону. Для создания мощного импульса тока в контуре необходимо произвести в момент времени t = t_1 вторую коммутацию и тогда получим следующую схему замещения (рис. 4).

В цепи будет присутствовать свободная составляющая тока, которая будет затухать по экспоненциальному закону, а именно:

$$i_{св} = I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$$

где $I_0 = \frac{U}{L} \cdot t_1$, а $\tau = \frac{L}{R}$

и $i_{св} = \frac{U}{L} \cdot t_1 \cdot e^{-\frac{t_R}{L}}$

Магнитная энергия, запасенная в поле диполя

$$W_э = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Примерный расчёт

Если $L = 0.5 \cdot 10^{-3}$ *Гн*, $t_1 = 10^{-2}$ *сек*, $U = 10^6$ *В*,

то $I_0 = \frac{105}{0.5} = 2 \cdot 10^6$ *А*,

после второй коммутации

$$\tau = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{1} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$$

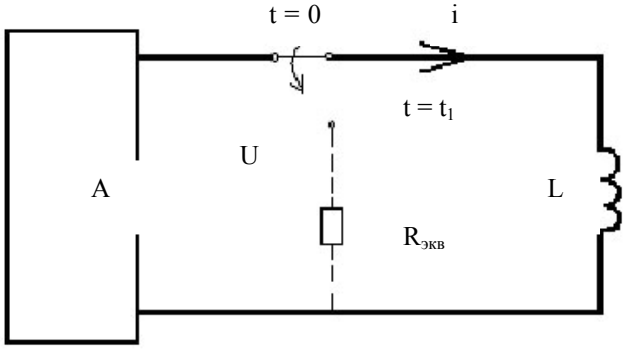

Рис. 3. Эквивалентная схема: A – идеальный источник бесконечно большой мощности; L – индуктивность диполя; R – сопротивление

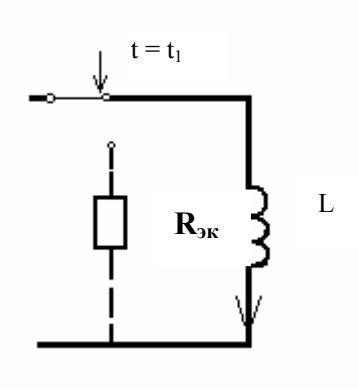

Рис. 4. Схема замещения

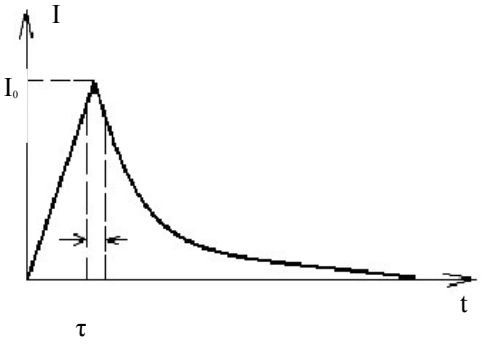

Рис. 5. Форма импульса тока

Переходной процесс закончиться через $t = (3 - 4) \cdot \tau$ (рис. 5).

Мы получим мощный импульс тока длительностью $t_u = 10^{-3}$ сек и амплитудой $\approx 2 \cdot 10^5$ А.

Напряженность магнитного поля в центре диполя составит:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{2 \cdot 10^6}{6.28 \cdot 20} \cong \cong 10^6 \ \frac{A}{м}$$

А магнитная индукция:

$$\overline{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \overline{H} \cong 0.5 - 0.7 \quad Гн$$

В результате теоретических исследований и моделирования процесса в первом приближении можно реализовать на практике получение коротких импульсов тока в магнитном диполе с амплитудой 10^6 А.

В качестве одного из вариантов рассмотрим пример ориентировочного оценочного расчёта параметров

Для ориентировочной оценки параметров рассмотрим виток с током, радиусом 20 м, расположенным в однородной изотропной магнитной среде (рис. 6).

Магнитная индукция в центре на оси определяется следующим образом:

$$\overline{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{\left(R^2 + \Gamma^2\right)^{\frac{3}{2}}},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м;

Для упрощения расчета принимаем Г = 0 и окончательно можно записать

$$\overline{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2SI}{R^3},$$

где S – площадь витка,.

Из лабораторного эксперимента нами получены предварительные значения магнитной индукции в импульсе, при которой происходят необратимые про-

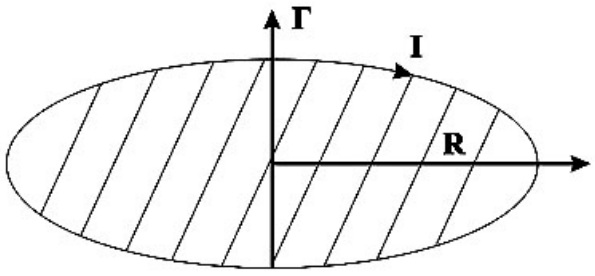

Рис. 6

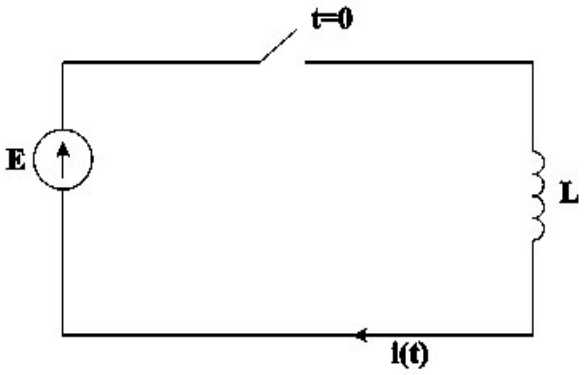

Рис. 7. Упрощённая схема замещения

цессы деструкции на межзерновых границах минералов кристаллических горных пород. Эти значения составляют $B = [0,5-1]$ Тл. На основании этого можно определить максимальные значения тока. При значении $B = 0,5$ Тл. Тогда ток в контуре составляет порядка $I_0 = 10^6$ А.

Продолжительность импульса $\Delta t = 10^{-4}$с

Упрощённая схема замещения при разряде на один виток представлена на рис. 7.

На основании 2-го закона Кирхгоффа имеем после коммутации

$$E = L\frac{di}{dt} \rightarrow di = \frac{E \cdot dt}{L} \rightarrow i(t) = \int \frac{E}{L} dt = \frac{E}{L} t$$

L – одного витка ≈ 10-5 Гн, t=10-4 с, и тогда для получения тока $I = 10^6$ А имеем $E = 10^5$ В

Эти параметры могут быть реализованы на базе современных накопителей энергии, различных электротехнических средств создания мощных импульсов тока

Ориентировочно плотность энергия в объеме материала охваченная контуром составляет примерно

$$W_Э = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \approx 10 \left[\frac{МДж}{м^3}\right].$$

Исследования, некоторые результаты которых представлены в настоящей статье, осуществлены при финансовой поддержке Совета по грантам РФФИ проект 07-05-13547.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. – М., 1973, с. 628-631.

2. *Нейман Л.Р., Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники. Т. 1, 2. – М.: Энергия, 1966.

3. *Тамм М.Е.* Основы теории электричества. – М.: Гостехиздат, 1956. ГИАБ

Коротко об авторах

Анисимов В.Н. – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, кафедра «Разрушение горных пород взрывом»,
Дудченко О.Л. – доцент, кафедра электротехники,
Московский государственный горный университет.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.А. Белин.*