

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СПИРАЛЬНОГО МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ NUMERICAL SIMULATION OF HELICAL MAGNETOCUMULATIVE GENERATOR WITH DYNAMIC LOAD

Е. Н. Кушанова, П. В. Королев, А. С. Пикарь, В. Д. Селемир
E. N. Kirshanova, P. V. Korolev, A. S. Pikar, V. D. Selemir

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Рассмотрены вопросы численной оптимизации работы спирально-коаксиального взрывомагнитного генератора при работе на быстроменяющуюся динамическую нагрузку. Показано, что быстроменяющаяся динамическая нагрузка оказывает заметное влияние на эффективность работы взрывомагнитного генератора и существенным образом меняет баланс энергии в нем. Расчет работы генератора проводился с учетом нелинейных потерь магнитного потока на диффузию магнитного поля в металл лайнера и статора. Учитывались потери потока при отсечении в точке контакта за счет деформации контура, как генератора, так и нагрузки.

This paper considers the issues of numerical optimization of operation of a helical-coaxial magneto-cumulative generator at its operation into fast varying dynamic load. It is shown that fast varying dynamic load significantly influences on operating efficiency of the magneto-cumulative generator and changes the energy balance in it. Calculation of the generator operation considers nonlinear losses of magnetic flux for magnetic field diffusion into metal parts of the liner and stator. The flux losses at cutoff in the contact point at the expense of the circuit deformation of both generator and load were also considered.

Как правило, разработка спиральных магнитокумулятивных (взрывомагнитных) генераторов проводится с целью оптимизации и получения больших величин магнитной энергии необходимой для питания различных нагрузок. Имеющиеся численные программы позволяют проводить расчет достаточно сложных спиральных генераторов для достаточно широкого диапазона индуктивных нагрузок (1, 2, 3, 4, 5) В то же время, когда скорость изменения индуктивности нагрузки сравнима или даже превышает скорость изменения индуктивности генератора, расчет работы генератора на быстроменяющуюся динамическую нагрузку имеет свою специфику и требует детального рассмотрения. Как правило, в таком генераторе нет роста тока и роста магнитной энергии. Генератор расходует вырабатываемую энергию на деформацию и ускорение стенок динамической нагрузки. То есть, химическая энергия взрывчатого вещества преобразуется не в магнитную энергию, а в кинетическую энергию нагрузки. Такой вид генераторов, в некоторых случаях, так же представляет интерес.

Рассматриваемая в докладе методика расчета спирально-коаксиальных магнитокумулятивных генераторов является дальнейшим развитием методики расчета более ранней работе авторов (6). Методика учитывает основные физические процессы, влияющие на работу магнитокумулятивных генераторов с многозаходными, многосекционными спиралями. Расчет ведется с использованием пакета специализированных программ. Сначала задаются размеры и конструктивные особенности генератора. Затем, при заданной начальной скорости лайнера, численно моделируется процесс столкновения лайнера с витками спирали и определяется время, требуемое для образования точки контакта. Далее для начального момента времени методом векторного потенциала находится распределение магнитных полей в полости генератора. С учетом неоднородности поля находятся коэффициенты для вычисления индуктивности. После такой предварительной подготовки, в программе выбирается соответствующая модель генератора и проводится расчет его работы для нахождения тока в нулевом приближении. Вычис-

ляется радиальное смещение витков статора, деформация поверхности лайнера и нагрузки под действием давления магнитного поля. Находится скорость изменения индуктивности, как генератора, так и нагрузки и вычисляются ток, напряжение, энергия. Ведется визуальный контроль динамики сжатия контура контроль баланса магнитного потока. Затем численно решается задача одномерной нелинейной диффузии магнитного поля и находится эффективная толщина скин-слоя магнитного потока для всех точек провода спирали, поверхности лайнера и токопроводящих стенок динамической нагрузки в первом и нескольких последующих приближениях.

Расчет магнитных полей

Для расчета магнитного поля ток генератора разлагается на продольную I_z и поперечную компоненту I_θ . В спиральной части генератора расчет полей ведется через векторный потенциал $\bar{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{j dV}{R}$, где j – плотность тока, dV – элемент объема.

Для I_θ компоненты тока уравнения для векторного потенциала имеют вид:

$$A_\phi = \frac{\mu_0 J}{\pi k} \sqrt{\frac{R_0}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right],$$

где полные эллиптические интегралы Лежандра I и II рода $K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha}}$ и $E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha} \cdot d\alpha$.

В расчетах витки соленоида и проводники задаются в виде набора проводящих колец с координатами R, Z , и диаметром D . Соединение витков соленоида задается вектором C_i связывающим точки соотношением: $J_i = J \cdot C_i$. При вычислении коэффициентов матрицы взаимоиנדукции L_{ij} , индуктивность кольца справедлива при высокой частоте с точностью до членов порядка $(2R/D)^4$, вычисляется по формуле: (7)

$$4\pi R \cdot 10^{-7} \cdot \left(\left(1 - \frac{D^2}{16R^2} \cdot \ln \frac{16R}{D} + \frac{D^2}{8R^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \log \frac{16R}{D} - 2 - \frac{D^2}{64R^2} \right),$$

Взаимная индуктивность коаксиальных круговых контуров с радиусами r и R вычисляется по формуле: $4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{rR} \left(\left(\frac{2}{k} - k \right) \cdot K(k) - \frac{2}{k} \cdot E(k) \right)$,

где $k^2 = \frac{4rR}{(r+R)^2 + (z-Z)^2}$.

Магнитный поток, сцепляющийся с каким-либо электрическим контуром, обусловленный как током в этом контуре, так и токами в других, соседних с ним контурах: $\Phi_i = \sum_{j=1}^N L_{ij} \cdot J_j$.

Векторный потенциал A_ϕ используется для вычисления компонент магнитной индукции $\bar{B} = rot A_\phi$.

$$B_r = \frac{\partial}{\partial Z} A_\phi = \frac{\mu_0 J}{2\pi \sqrt{(R+r)^2 + z^2}} \times \\ \times \frac{z}{r} \cdot \left(-K(k) + E(k) \frac{1-k^2/2}{1-k^2} \right);$$

$$B_z = \frac{\partial}{r \partial r} (r \cdot A_\phi) = \\ = \frac{\mu_0 J}{2\pi \sqrt{(R+r)^2 + z^2}} \left(K(k) - E(k) \cdot \left(1 - \frac{k^2(1-k^2)}{2(1+R/r)} \right) \right).$$

Для I_z компоненты тока используются аналитические формулы поля коаксиальных проводников.

Сжатие магнитного потока

Рассмотрим уравнение Максвелла для электромагнитной индукции, записанное в интегральной форме: $\oint_L Edl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$; здесь E – напряженность электрического поля в точках контура L , по которому ведется интегрирование, Φ – магнитный поток в этом контуре.

Если мы выберем замкнутый контур, охватывающий магнитный поток в генераторе вместе с нагрузкой, проходящий там, где напряженность электрического равна, то поток в этом контуре меняться не будет, то есть $\Phi = const$ для всех моментов времени. В тех случаях, когда поток выходит

за пределы контура (омическая нагрузка, отсекание потока в точках контакта, место где толщина стенок меньше скин-слоя и т. д.), будем находить потери потока и вычитать их.

Для характерных размеров генератора, когда время пробега волны давления много меньше времени работы генератора, можно воспользоваться нульмерным приближением сосредоточенной массы и вычислять смещение для точек на поверхности токопровода и нагрузки по формуле:

$$X = \frac{\mu_0}{2\rho \cdot \delta \cdot h^2} \iint_{t_1} I^2 dt dt$$
, где ρ – плотность, δ – толщина, h – ширина токопровода, t_1 – момент начала деформации.

Для поперечной компоненты тока I_θ индуктивность вычисляется по формуле: $k \cdot \mu_0 \cdot \int \frac{dV}{h^2}$, где

h – ширина токопровода, а интегрирование ведется по объему занятому магнитным полем. k – поправочный коэффициент учитывающий неоднородность поля.

В процессе счета для каждого момента времени находится геометрия токопроводов с учетом запаздывания разрушения изоляции. Следующим шагом является определение геометрической точки контакта, как точки пересечения двух кривых – внешней поверхности лайнера и внутренней поверхности статора. После этого, находится индуктивность контура отсеченного точкой контакта L_s и индуктивность оставшегося токового контура L_c . Из закона сохранения магнитного потока на каждом шаге по времени находится ток в оставшемся токовом контуре.

Результаты расчетов

Для демонстрации методики расчета рассмотрим работу спирально-коаксиального генератора с диаметром конусной спирали 360 мм и динамической нагрузкой в виде коаксиала с толщиной наружной стенки 1 мм. Мы ожидаем, что при росте давления магнитного поля стенка коаксиальной нагрузки при превышении предела прочности металла будет деформироваться. В расчетах полагаем что деформация стенки нагрузки ограничена по радиусу толстостенными токопроводами и имеется лишь одна степень свободы в продольном направлении.

При увеличении магнитного поля происходят значительные деформации токового контура не только нагрузки, но и самого генератора, что приводит к потерям в результате отсекания магнитного потока в образующихся петлях.

На рис. 1 приведена схема спирально-коаксиального конусного взрывомагнитного генератора с коаксиальной динамической нагрузкой в виде диска с массой 0,1 кг. Подрыв заряда ВВ осуществляется на 50 мкс, при этом волна детонации движется слева на право. В процессе работы генератора происходит деформация токового контура. Схема деформированного контура на момент времени 150 мкс показана на рис. 2.

По мере движения лайнера уменьшается индуктивность контура, и ток генератора нарастает до 14 МА (рис. 3). Затем, за счет роста индуктивности контура при движении стенки нагрузки и потерь на диффузию магнитного поля, происходит падение тока до 9 МА. При этом падает полная магнитная энергия контура и увеличивается кинетическая энергия стенки нагрузки. Максимальная

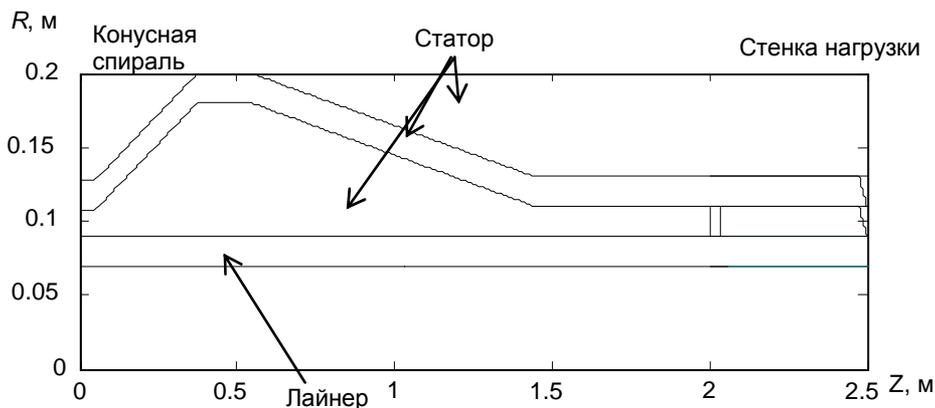


Рис. 1. Схема спирально-коаксиального конусного магнитокумулятивного генератора с коаксиальной динамической нагрузкой

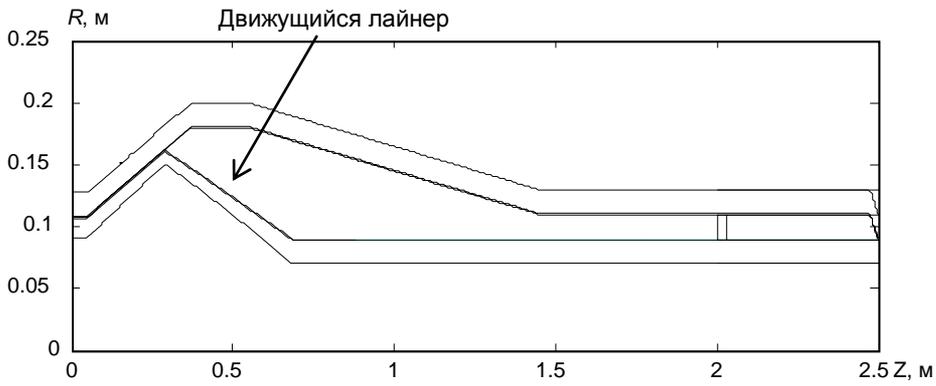


Рис. 2. Схема спирально-коаксиального конусного магнитокумулятивного генератора на момент времени 150 мкс

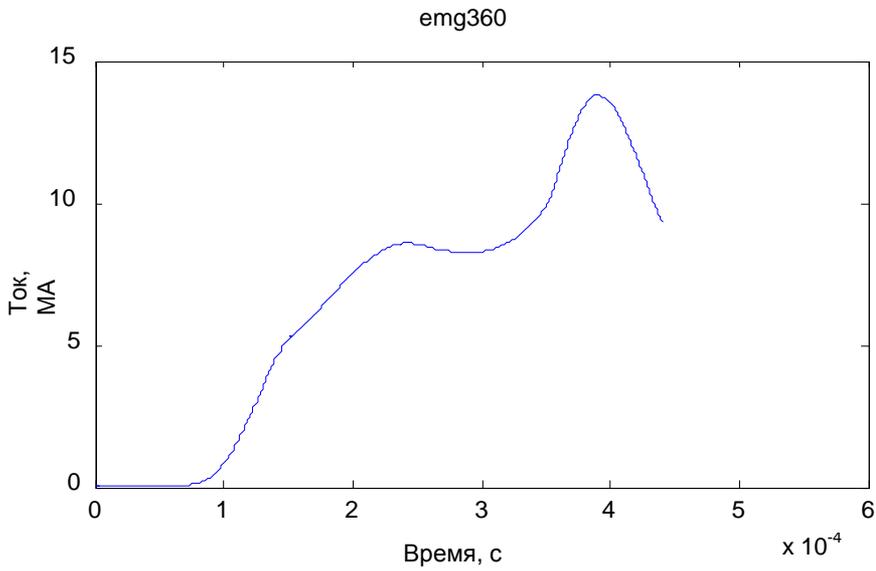


Рис. 3. Расчетный ток генератора при работе на динамическую нагрузку

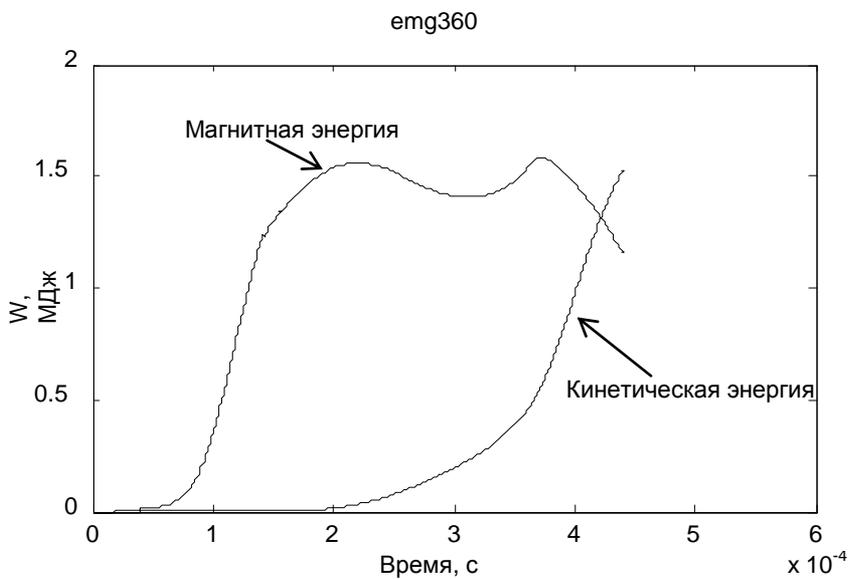


Рис. 4. Баланс энергии при работе генератора на динамическую нагрузку

магнитная энергия генератора достигает 1,5 МДж, кинетическая энергия стенки нагрузки находится примерно на том же уровне 1,5 МДж (рис. 4). Таким образом, взрывомагнитный генератор при работе на быстроменяющуюся динамическую нагрузку способен довольно эффективно преобразовывать кинетическую энергию лайнера в кинетическую энергию нагрузки. В рассмотренном примере кинетическая энергия нагрузки сравнима с магнитной энергией токового контура генератора.

Заключение

Представленная в докладе численная методика расчета спирально-коаксиальных конусных генераторов позволяет проводить математическое моделирование работы генератора на быстроменяющуюся динамическую нагрузку. Показано что магнитокумулятивный генератор может эффективно использоваться не только для получения мегаджоульных величин магнитной энергии, но и способен эффективно передавать в динамическую нагрузку мегаджоульные потоки кинетической энергии.

Список литературы

1. Jones M. An equivalent circuit model of a solenoidal compressed magnetic field generator // in *Megagauss Physics and Technology*, P.J. Turchi, Ed. New York: Plenum, 1980. P. 249–264.
2. Tucker T.J. A finite-element model of compressed magnetic field current generators // in *Megagauss Physics and Technology*, P.J. Turchi, Ed. New York: Plenum, 1980. P. 265–223.
3. Cowan M., Kaye R.J. A finite-element circuit model of helical explosive generators // *Сверхсильные магнитные поля Физика. Техника. Применение*. Под ред. В.М. Титова и Г.А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 240–245.
4. Новак Б. М., Смит И. Р., Эначе М. С., Стewardсон Х. Р. Простая двумерная модель спиральных генераторов сжатия потока / Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение // Под Ред. В.К. Чернышева, В.Д. Селемира, Л.Н. Пляшкевича. г. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 477–482.
5. Голованов В. В., Исаков В. П., Лопатин М. В. Численное моделирование многоконтурных спиральных взрывомагнитных генераторов // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение // Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. г. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1 . С.484–489.
6. Pikar A. C., Deryugin Yu. N., Korolev P. V., Klimashov M. V. Method of Computational Modeling of a Magnetic Flux Compression in Helical Magneto-cumulative Generators / *Megagauss-9. Proceedings of Ninth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* // Eds. V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov: VNIIEF. 2004. P. 578–582.
7. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей // Ленинград: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1986.