

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОВОДНИКЕ НА ПОТЕРИ МАГНИТНОГО ПОТОКА МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. В. Гавриловец, В. В. Тихомиров

ВВЕДЕНИЕ

Магнитокумулятивные генераторы (МКГ) являются уникальными мощными компактными устройствами, которые позволяют получать рекордные значения тока и напряженности магнитного поля. Трудности описания и моделирования работы МКГ делают необходимым учитывать большое количество разнообразных физических процессов. В качестве оптимальной модели была предложена 2-D модель работы МКГ [1]. Однако, в [1] утверждается, что в отработавшей части МКГ магнитный поток должен быть равен нулю, соответственно, реализуется искусственный подход пересчета распределения тока на каждом шаге моделирова-

ния с перераспределением магнитного потока в работающую часть МКГ из отработавшей части. В этой статье мы предлагаем альтернативный подход, согласно которому у отработавшей части МКГ магнитный поток не обнуляется и не требуется перераспределения магнитного потока. Оставшийся магнитный поток в отработавшей части МКГ описывает внутренние потери магнитного потока [2]. Как результат успешного применения нового подхода предлагается описание различий потерь магнитного потока в сильно различающихся конструкциях МКГ.

1 РАЗБИЕНИЕ ПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

МКГ – устройство одноразового действия [3], состоит из статора (спиральная проводящая обмотка). Внутри него расположена арматура (металлическая труба), заполненная взрывчатым веществом (ВВ). Продукты детонации ВВ воздействуют на арматуру, расширяя его поперек силовых линий созданного заранее магнитного поля. Накопленная магнитная энергия импульсного тока передается в нагрузку.

Для точного расчета сопротивления и индуктивности МКГ статор разделяется на отдельные эквивалентные круговые контуры витков спирали, связанные гальванически. Арматура разделяется на независимые эквивалентные контуры колец рис. 1. Данное разделение позволяет максимально точно рассчитать индуктивность МКГ и правильно учесть сопротивление каждого контура в системе уравнений для контуров витков статора и контуров колец арматуры:

$$\sum_i M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + \sum_i \frac{dM_{ij}}{dt} I_j + \Omega_i I_i = U_i,$$

где $L_i = M_{ii}$ собственная индуктивность контура, Ω_i – сопротивление контура, M_{ij} – взаимная индуктивность контуров i, j , U_i – напряжение на контуре (гальваническая связь), напряжение на контурах колец арматуры равно нулю, так как они свободны и связаны с другими контурами только индуктивно.

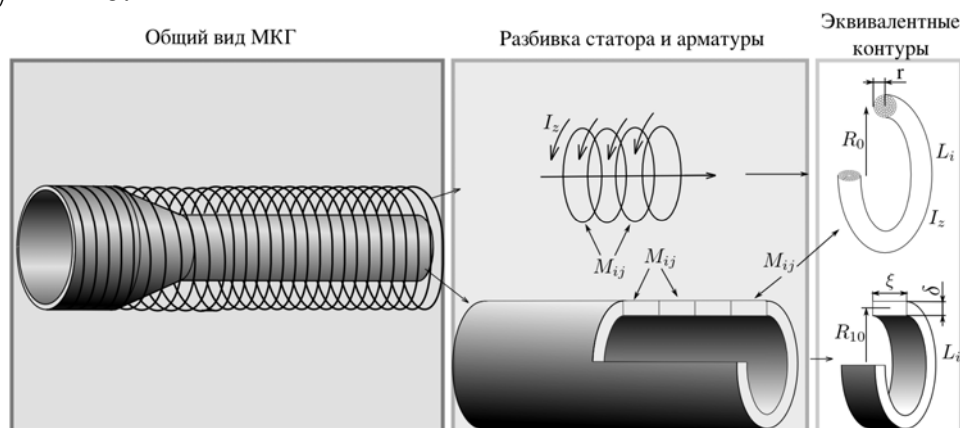


Рис. 1. Общий вид и разделение проводящих конструкций МКГ

2 ПОТЕРИ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Основными путями потерь магнитного потока в МКГ являются потери на активном сопротивлении и внутренние потери магнитного потока. Расчет активного сопротивления МКГ осуществляется, как правило, через толщину скин-слоя и, при отсутствии существенного нагрева, влияющего на толщину скин-слоя, достаточно точно. Рассмотрение полей магнитного поля МКГ и сравнение экспериментальных данных с результатами расчета указывают ещё на один существенный источник потерь магнитного потока, так называемые потери внутреннего потока [2]. Эти потери могут быть описаны параметром α – коэффициентом сохранения магнитного потока, изменяющимся в диапазоне от 0 до 1:

$$I\alpha \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt} + I\Omega = 0$$

где L – индуктивность МКГ, I – ток в МКГ, Ω – активное сопротивление МКГ.

В [2] наиболее вероятным источником этих потерь называется «вмораживание» магнитного потока в проводник, но предлагается рассчитывать коэффициент сохранения магнитного потока из эксперимента. Недавно в [4,5] была предложена модель расчета внутренних потерь магнитного потока, которая лучше согласуется с результатами экспериментов для различных конструкций МКГ. В этой модели магнитный поток, связанный с собственной индуктивностью витков спирали статора, теряется при отсечении точкой контакта.

Внутренние потери магнитного потока удобно описать в терминах сопротивления. С увеличением эффективной средней частоты тока в МКГ уменьшается толщина скин-слоя. Соответственно, уменьшается магнитный поток «вмороженный» в проводник и теряемый с витками обмотки за точкой контакта статора и арматуры.

Для простейшего однозаходного МКГ, статор которого намотан одним проводом с постоянным шагом, эффективное сопротивление внутренних потерь магнитного потока и активное сопротивление, рассчитанное с помощью магнитной диффузии представлены на рис. 2а.

Для многозаходного МКГ с аналогичными геометрическими параметрами, но с секциями с увеличивающимся количеством заходов (параллельно намотанных проводов), эффективное сопротивление внутренних потерь магнитного потока и активное сопротивление представлено на рис. 2б.

Как видно из рис. 2б, при увеличении количества заходов уменьшается эффективное сопротивление внутренних потерь магнитного потока. Для многозаходного МКГ к концу работы эффективное сопротивление практически равно активному сопротивлению. Это связано с уменьшением магнитного потока «вмороженного» в проводник, и отсекаемого

точкой контакта статора и арматуры. Запасенной энергии в однозаходном МКГ больше, но производная тока больше в многозаходном МКГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод расчета внутренних потерь магнитного потока, основанный на принципе отсечения магнитного потока в отработавшей части МКГ. Этот принцип не требует перерасчета распределения тока для перераспределения магнитного потока в работающей части МКГ, как в [1].

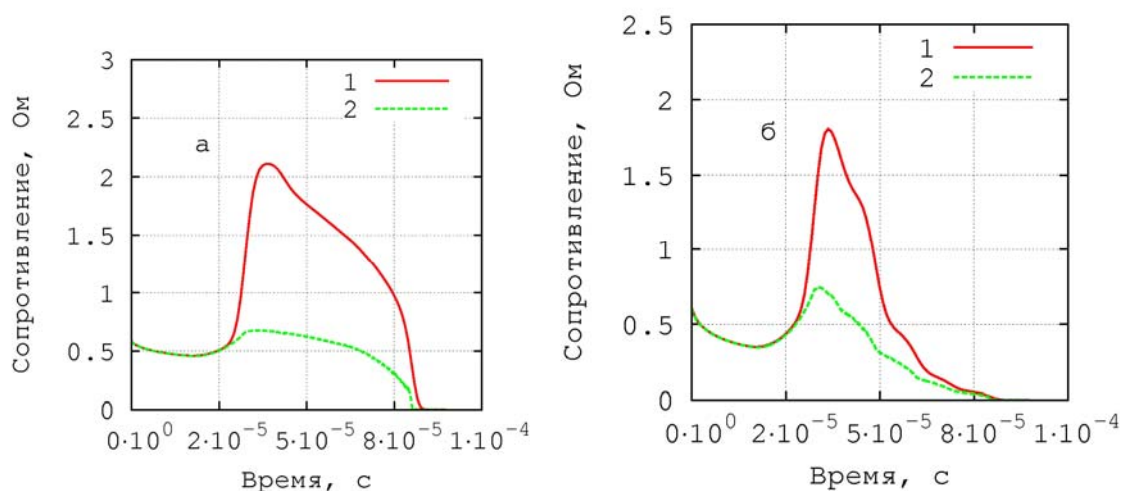


Рис. 2. 1-эффективное сопротивление внутренних потерь магнитного потока и 2 - активное сопротивление МКГ, где а – однозаходный МКГ, б – многозаходный МКГ

В МКГ основные источники потерь это потери на активном сопротивлении и внутренние потери магнитного потока. Используя распараллеливание статора (многозаходность) и секции статора с увеличивающимся количеством заходов, можно значительно уменьшить внутренние потери магнитного потока, следовательно, увеличить коэффициент усиления энергии, тока МКГ.

Литература

1. Novac B. M., Smith R. I., Enache M. C., Stewardson H. R. "Simple two-dimensional model for helical flux-compression generators". Proc. Int. Conf Megagauss 7, 1997. P. 468-474.
2. Neuber A. A. (editor) «Explosively Driven Pulsed Power : Helical Magnetic Flux Compression Generators» // Springer, Berlin, 2005. P. 280.
3. Фортон В. Е. «Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока» / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука. 2002.

4. *Haurylavets V. V., Rouba A. A., Siahlo S. E., Sytova S. N., Tikhomirov V.V.* «2D magnetic flux loss modeling of fast FCG» // The 13-th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Suzhou, China, 2010.
5. *Гавриловец В.В., Тихомиров В.В.* «Влияние диффузии электромагнитного поля в проводник на эффективное сопротивление магнитокумулятивного генератора» // Сборник работ 67-я научной конференции студентов и аспирантов БГУ, Минск, Беларусь, 2010. С. 92-96.