

Схемотехническое моделирование системы питания электромагнита быстроциклического бустера ИФВЭ

А. С. Гуревич, О. П. Лебедев

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Современные программы компьютерного моделирования электрических схем, такие как Saber (Analog), PSpice (OrCAD), позволяют по-новому взглянуть на многие проблемы при конструировании и поиске неисправностей в электронном оборудовании. Наличие в программах большого количества встроенных библиотек электрических компонентов и возможность написания своих библиотек создают условия создания сложного электронного оборудования с предсказуемой по характеристикам точностью. Практический опыт компьютерного проектирования больших систем в ведущих фирмах, занятых изготовлением высококачественного коммерческого оборудования, является примером такого подхода. Схемотехническое моделирование позволяет существенно сократить время на разработку аппаратуры и тем самым снизить стоимость изделия. На базе программного пакета PSpice [1] было проведено схемотехническое моделирование системы питания электромагнита быстроциклического бустера ИФВЭ. Цель исследований состояла в определении причин пульсаций тока, возникающих в кольцевом электромагните бустера и влияющих на динамику пучка. Электронная модель, соответствующая совокупности исходных проектных данных, содержала более 10000 встроенных элементов.

1. Модель системы питания бустера

Особенности системы питания электромагнита подробно изложены в работе [2]. Здесь уместно только напомнить, что система питания основных обмоток кольцевого электромагнита бустера построена по импульсно-резонансной схеме (White Circuit) [3], [4], которая имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как, низкая стоимость и слабое влияние на питающую сеть. Частота, с которой работает синхротрон, в первом приближении может быть выражена $f_0 = (2\pi(LC))^{0.5}$ ⁻¹, где C – емкость последовательно включенных накопительных конденсаторных батарей, L – полная индуктивность магнита.

На рис. 1 приведена блок-схема системы питания электромагнита бустера ИФВЭ. Подготовительный этап работы системы питания синхротрона сводится к заряду конденсаторных батарей $C0, C1, C2, C4$ до необходимых уровней напряжения. В дальнейшем с помощью комбинации ключей Tn – тиристорных батарей, DTn – диодно-тиристорных батарей осуществляется разряд конденсаторных батарей на нагрузку $C1_n$ ($Chain1_n$) электромагнита. Одновременно следует процесс подзарядки батарей выпрямителями подпитки VPn , компенсирующими активные потери энергии в цепи электромагнита. Программное управление ключами позволяет сформировать магнитный цикл требуемой формы, создать инжекционную площадку поля, рост поля для адиабатического захвата частиц в ускорение, площадку вывода и быстрый спад магнитного поля. Каждый прямоугольник на рис. 1 (первый уровень схемы) представляет собой многоуровневое вложение. Так, например, тиристорная батарея $T5$ (см. рис. 2 – второй уровень схемы) состоит из последовательно параллельного соединения однотипных тиристорных ключей T2-320 с элементами «обвязки» (см. рис. 3 – третий уровень схемы). Все номиналы элементов (без учета разброса) взяты для моделирования из реально работающих схем. Магнитная система ускорителя состоит из 12 периодов (римские цифры над блоками на рис. 1). По технике запитки током она разделена на квадранты $M1, M3, M2, M4$. На рис. 4 изображена эквивалентная схема периода. Номиналы элементов получены в ходе анализа экспериментальных данных измерений импедансов периода, работающего в режимах холостого хода Z_0 и короткого замыкания Z_s . На рис. 5 показаны результаты экспериментальных измерений импедансов периода (жирные линии) и модели эквивалентной схемы (тонкие линии). $Z = (Z_0 Z_s)^{0.5}$ – истинный импеданс одного периода магнитной структуры бустера. В ходе моделирования переходных процессов в схеме системы питания электромагнита, PSpice рассчитывает напряжения во всех узловых точках, а также токи в элементах схемы. Общее количество расчетных параметров составляет около 30000. В программном пакете эти данные используются в дальнейшем для представления графической информации, а также для последующего математического анализа. Объем памяти жесткого диска компьютера, требующийся для записи одного полного файла данных, составлял порядка 150 Мб. Время одного кванта моделирования около 20 минут (Pentium III, 500 МГц).

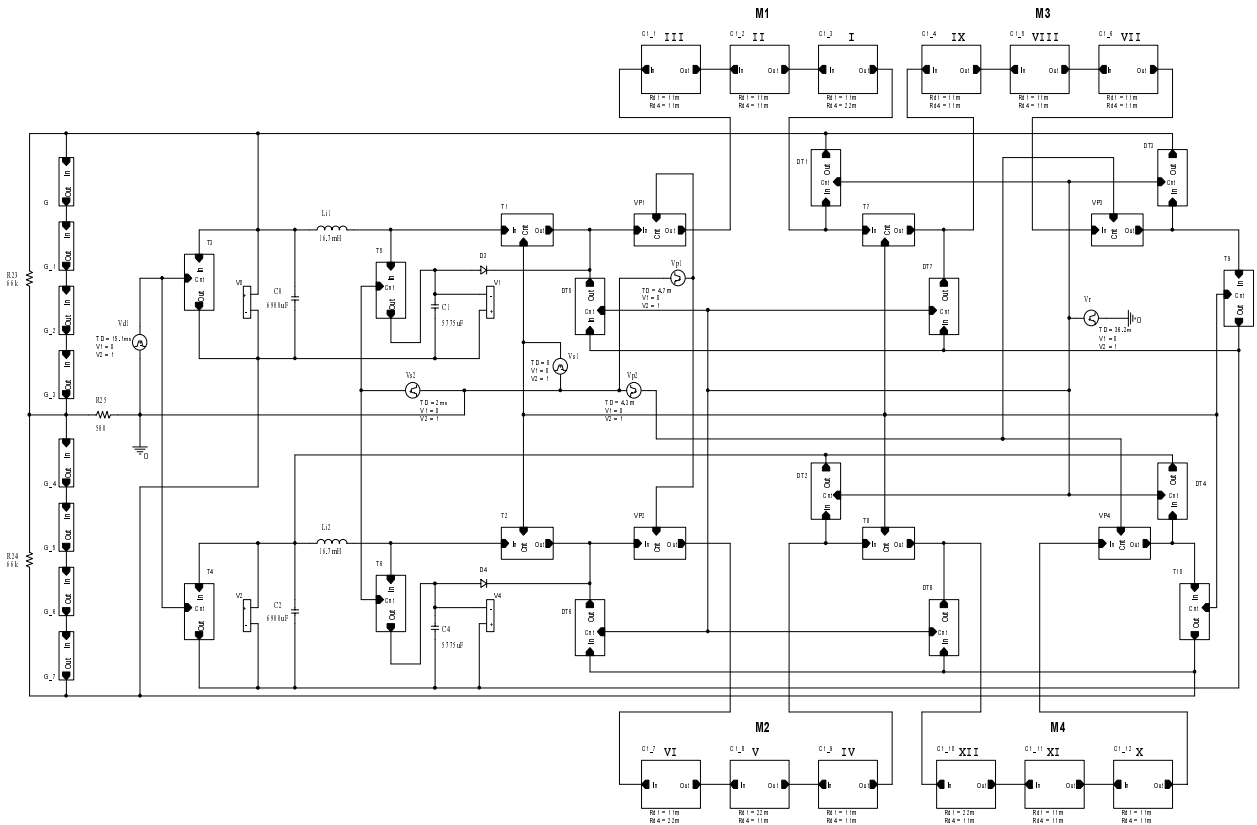


Рис. 1. Блок-схема системы питания электромагнита бустера ИФВЭ (первый уровень схемы).

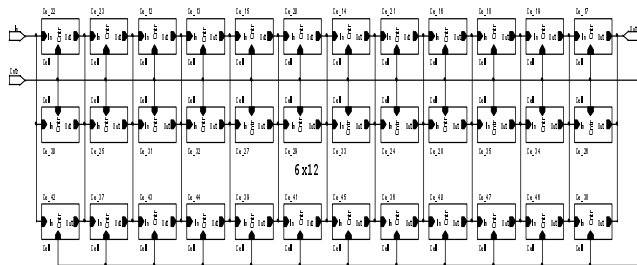


Рис. 2. Блок-схема тиристорной батареи T5 (второй уровень схемы).

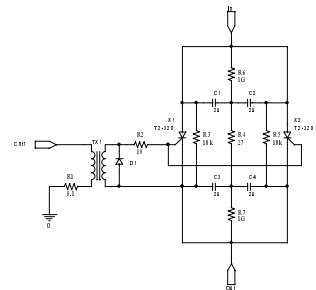


Рис.3 Схема тиристорных ключей T5 (третий уровень схемы).

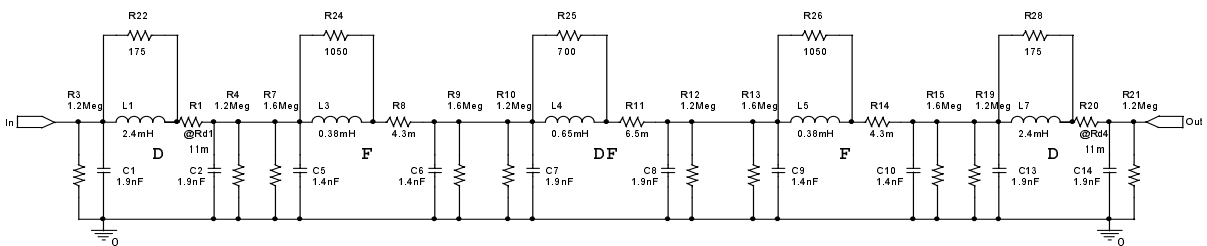


Рис. 4. Эквивалентная схема магнитного периода.

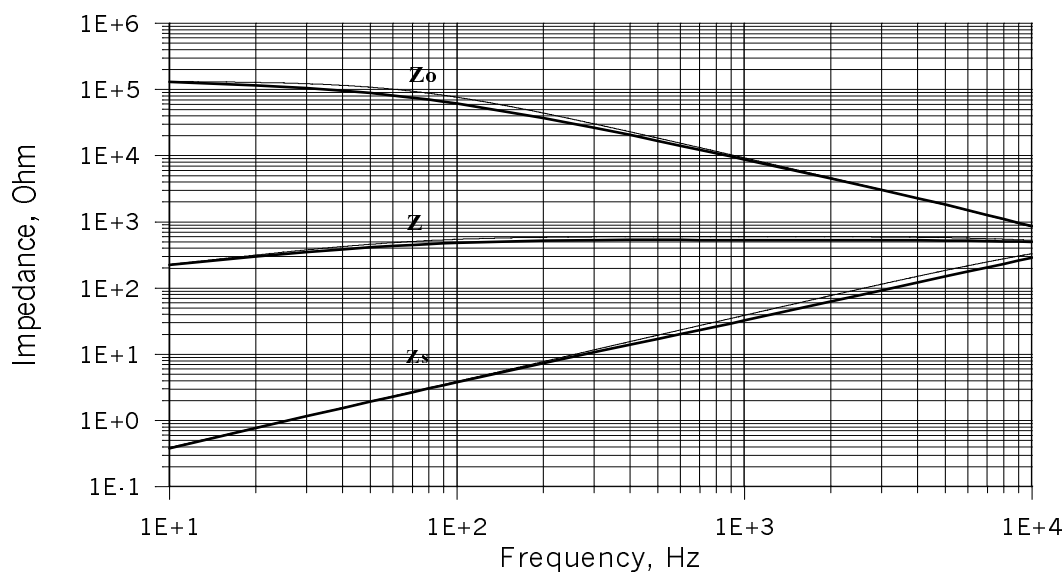


Рис. 5. Импедансы магнитного периода.

2. Экспериментальные результаты моделирования

На рис. 6 приведены 4 диаграммы поведения токов и напряжений в модели системы питания электромагнита. Выбор контролируемых точек не случаен и обусловлен наличием датчиков тока и поля в реально работающей системе на бустере [5]. На рисунке можно видеть, что в районе 6 мсек в разности токов, протекающих в XII и I периодах магнитной структуры, присутствует колебательный процесс. Объяснение этому будет дано ниже.

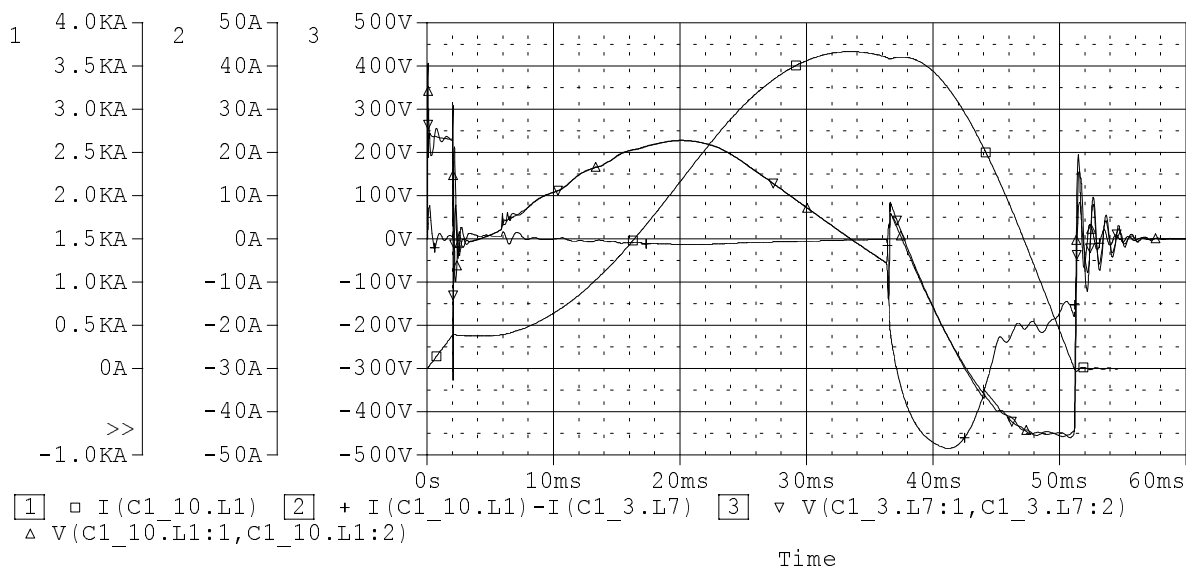


Рис. 6. Диаграммы поведения параметров в модели системы питания электромагнита бустера: \square – ток в магните; $+$ – разница токов, протекающих в XII и I периодах; ∇ – разность потенциалов на индуктивности последнего дипольного магнита I периода; Δ – разность потенциалов на индуктивности первого дипольного магнита XII периода.

Так как мы решали обратную задачу, заключающуюся в поиске неисправных элементов уже работающей системы, то на основании многочисленных экспериментальных данных, измеренных в различных точках системы питания бустера, в схему модели вносились изменения. В основном они касались синхронизации работы ключей в системе.

Было установлено, что если один из выпрямителей подпитки VP задержать с включением в работу по отношению к остальным синхронно работающим, то наблюдается переходной процесс, с возникновением разности токов в квадрантах электромагнита, хорошо совпадающий с экспериментально наблюдаемым в [5]. Причем варьированием времени включения VP можно получить разные по величине ошибки. На рис. 7 приведена разность токов, протекающих в XII и I периодах магнитной структуры.

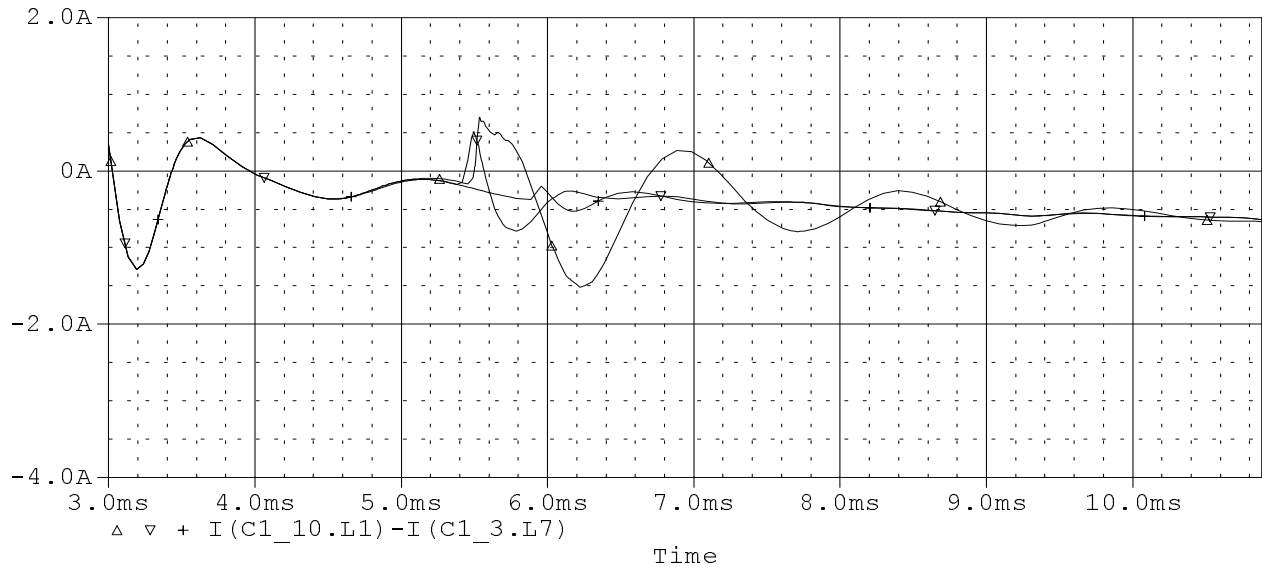


Рис. 7. Разность токов для трех случаев: (Δ) – один $VP3$ включился позже остальных; (∇) – одновременное включение VPn ; (+) – включение VPn , синхронизированное с фазой питающей сети 50 Гц.

Как видно из рис. 7, случай (∇) не приводит к пропаданию переходного процесса. Наблюдается заметное уменьшение его длительности. Случай (+) интересен тем, что величина пульсаций разности тока может быть уменьшена почти на порядок. Колебания разности токов в магните не носит гармонического характера. «Период» колебаний, а также форма волны зависят не только от того, какой выпрямитель подпитки задержан и на какое время, но и от параметров элементов «обвязки» ключей.

В ходе моделирования установлено, что все колебательные процессы в электромагните обусловлены протеканием «остаточных» токов по цепям «обвязки» ключей. При модернизации системы питания это обстоятельство должно быть учтено. Тогда амплитуды колебательных процессов ведущего поля в электромагните бустера будут существенно уменьшены.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность С. В. Васину и В. С. Маршанскому за предоставление данных о текущем состоянии системы питания электромагнита бустера и обсуждение особенностей эксплуатации системы при работе бустера с пучком.

Литература

- [1] MicroSim PSpice A/D, MicroSim Corporation, 20 Fairbanks, Irvine, California 92618.
- [2] Гусев О.А. и др. – В сб. Электрофизическая аппаратура, вып. 14, М., Атомиздат, 1976, стр. 24.
- [3] Kobayashi Y. The Series Resonance Circuit for the Excitation of the Synchrotron Magnet, INS-TH-23, 1957, Inst. for Nucl. Study, University of Tokyo.
- [4] Fox J.A. Resonant Magnet Network and Power Supply for the GeV Synchrotron NINA, Proc. IEE 112, 1965, pp. 1107–1126.
- [5] Васин С.В. и др. Экспериментальное изучение влияния пульсаций поля кольцевого электромагнита на динамику пучка в бустере ИФВЭ. Доклад на настоящей конференции. 2000.