

СХЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА ТРЕУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

В. В. ИВАШИН, Э. Г. ФУРМАН

(Представлена научно-исследовательским институтом
ядерной физики, электроники и автоматики)

В ускорительной технике широкое применение получили схемы питания в виде колебательного контура конденсаторная батарея — электромагнит ускорителя, настроенного на частоту источника питания. Такая схема имеет, однако, ряд существенных недостатков, основным из которых является неиспользование второй полуволны синусоиды тока для цели ускорения. Известны импульсные схемы питания электромагнитов ускорителей от емкостных накопителей энергии, в которых для целей ускорения используются обе полуволны импульса тока. При этом наиболее экономичными являются схемы питания, в которых емкостный накопитель работает в однополярном по напряжению режиме [1, 2, 3]. Однополярный по напряжению режим работы накопительного конденсатора обеспечивает уменьшение потерь (и увеличения долговечности) не менее чем в 4÷6 раз по сравнению с двухполярным режимом работы. Это позволяет использовать в схемах питания энергоемкие импульсные конденсаторы и тем самым существенно уменьшить вес конденсаторной батареи без снижения ее ресурса работы по сравнению с синусоидальным режимом [4].

Наиболее рациональной формой магнитного цикла в электромагните бетатрона является треугольная форма. Однополярные схемы принципиально позволяют получать треугольную форму импульсов тока путем прерывания процесса разряда емкости на электромагнит при углах меньше $\pi/2$ периода разряда и осуществлять через обратные вентили рекуперацию энергии магнитного поля в конденсаторную батарею. Например, уже при угле 75 эл. град. потери энергии в обмотке электромагнита уменьшаются в 2,96 раза, а при угле 60° — в 12 раз. Максимальное же значение тока и поля магнита при этом уменьшается соответственно только на 3,5% и 13%. Применение схем с треугольной формой тока магнита позволяет существенно повышать частоту импульсов ускорения, а следовательно, и среднюю интенсивность его излучения [1].

На рис. 1 приведена наиболее простая схема питания электромагнита бетатрона импульсами тока треугольной формы. Емкостный накопитель C_1 через управляемые вентили T_1 , T_2 и обратные диоды D_1 и D_3 , D_4 , D_5 подключен к обмотке электромагнита L_m . Параллельно диодам D_4 , D_5 подключены коммутирующие конденсаторы C_3 , C_4 , имеющие зарядную цепь, состоящую из диода D_5 и индуктивности L_1 . Последова-

тельно с диодами D_1 и D_2 включены обмотки дросселя насыщения, магнитопровод которого подмагничивается током электромагнита. Для компенсации потерь в колебательном контуре ускорителя и стабилизации максимальной величины энергии LC контура применен импульсный ввод энергии от источника постоянного тока [3,5]. Цель импульсного ввода энергии состоит из буферной емкости C_2 , зарядной индуктивности L_2 и управляемого вентиля T_3 .

В исходном состоянии конденсатор C_1 заряжен до требуемого уровня напряжения, энергия в остальных элементах силового контура системы питания отсутствует. С приходом управляющих импульсов на

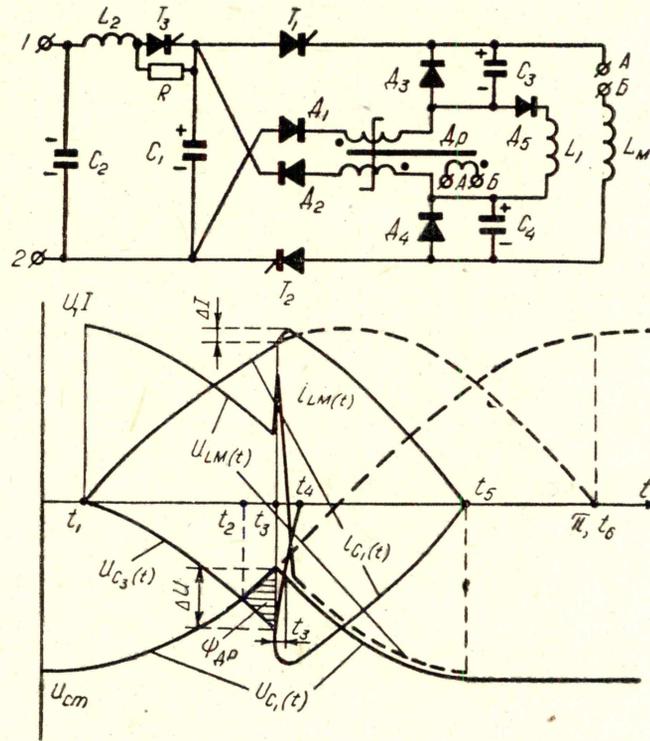


Рис. 1. Схема питания электромагнита импульсами тока треугольной формы

тиристоры T_1 и T_2 конденсатор C_1 начинает разряжаться на электромагнит. В это же время конденсаторы C_3 и C_4 начинают заряжаться через диод D_5 и зарядную индуктивность L_1 . При равенстве напряжений на конденсаторах C_3 , C_4 и C_1 диоды D_1 и D_2 открываются и дроссель насыщения в интервале $t_2 - t_3$ начинает перемагничиваться под действием разности напряжений конденсаторов. В момент времени t_3 дроссель насыщается, и под действием напряжений конденсаторов C_3 и C_4 , которые больше напряжения конденсатора C_1 , тиристоры T_1 и T_2 выключаются. Ток электромагнита коммутирует из цепи тиристоров в цепь — конденсатор C_4 , обмотка дросселя насыщения, диод D_2 , конденсатор C_1 , диод D_1 , обмотка дросселя насыщения, конденсатор C_3 . При этом конденсаторы C_3 и C_4 полностью разряжаются током электромагнита и шунтируются соответственно диодами D_3 и D_4 . Энергия коммутирующих конденсаторов переходит в энергию магнитного поля электромагнита, за счет чего ток в нем возрастает на величину ΔI . К моменту разряда конденсаторов C_3 и C_4 в зарядной индуктивности остается энергия, которая переходит в энергию электрического поля накопительного конденсатора C_1 . Ввод энергии от источника питания

для компенсации потерь в контуре происходит на спадающей части импульса тока магнита, для чего тиристор T_3 открывается после перевода тока из тиристоров в диоды. Ввод энергии сопровождается уменьшением длительности спада тока в электромагните.

Таким же способом возможно формировать в электромагните поля трапецеидальной формы, которая может потребоваться при медленном выводе электронов. Для этого необходимо последовательно с диодами D_1 и D_2 включить отдельные дроссели насыщения и за счет изменения параметров коммутирующих конденсаторов или величин индуктивности зарядных дросселей разнести во времени момент коммутации тока тиристора T_1 относительно T_2 .

Регулирование угла коммутации тока тиристоров возможно осуществлять за счет изменения индуктивности дросселя L_1 . Если вентиль D_5 выполнить управляемым, то путем изменения момента включения вентиля D_5 относительно момента включения тиристоров T_1, T_2 возможно регулирование угла коммутации тока тиристоров без изменения величины зарядной индуктивности.

Отличительной особенностью схемы является то, что искусственная коммутация тока из управляемых вентилях в неуправляемые осуществляется без использования специальных управляемых приборов, что повышает надежность и упрощает эксплуатацию схемы питания.

Энергия, запасаемая в индуктивности и конденсаторах коммутирующей цепи, во много раз меньше энергии емкостного накопителя, поэтому с достаточной высокой степенью точности дифференциальное уравнение процесса заряда конденсаторов можно записать как

$$L_1 \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} \frac{d U_c(t)}{dt} + 2 U_c(t) = U_{cm} \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

где ω — собственная круговая частота контура C_1, L . Решение этого уравнения

$$U_{c3}(t) = U_{c4}(t) = \frac{U_{cm} \cdot \omega_1^2}{2(\omega^2 - \omega_1^2)} (\cos \omega t - \cos \omega_1 t), \quad (2)$$

где ω_1 — круговая частота контура L_1, C_3, C_4 . Момент времени включения диодов D_1 и D_2 , т. е. момент равенства напряжений коммутирующих конденсаторов и накопительного конденсатора, можно выразить как

$$\omega t_2 = \arccos \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2 + \omega^2} \right). \quad (3)$$

Величина угла коммутации тока тиристоров T_1 и T_2 зависит только от соотношения частот контуров L, C_1 и C_3, L_1, C_4 . На рис. 2 приведены зависимости величины угла коммутации от соотношения частот этих контуров. Зависимость 1 приведена для случая, когда конденсаторы C_3 и C_4 имеют отдельные зарядные индуктивности, зависимость 2 — когда общую, рис. 1. Величина потокосцепления коммутирующего дросселя зависит от разности напряжения коммутирующих конденсаторов C_3 или C_4 и накопительного C_1 и времени перемагничивания дросселя $t_3 - t_2$, рис. 1. Потокосцепление дросселя можно определить как

$$\Psi = \int_{t_2}^{t_3} [U_{c3}(t) - U_{c1}(t)] dt = \frac{\Delta U \cdot t_B \cdot I_m \cdot \sin \omega t_2}{2 U_{cm} \cdot C(\omega + \omega_1)}, \quad (4)$$

где C — эквивалентная емкость двух последовательно соединенных конденсаторов C_3 и C_4 ; t_B — время, отводящееся тиристорам для восстановления вентильных свойств; I_m — максимальное значение тока электромагнита при полном разряде накопительного конденсатора.

Величины коммутирующих конденсаторов, зарядной индуктивности в основном зависят от времени восстановления вентильных свойств тиристорами T_1 , T_2 и угла коммутации тока тиристоров. Время восстановления вентильных свойств определяется как

$$t_B = \frac{\Delta U \cdot C_1 \cdot C_3}{I_m (C_1 + C_3) \sin \omega t_3} \quad (5)$$

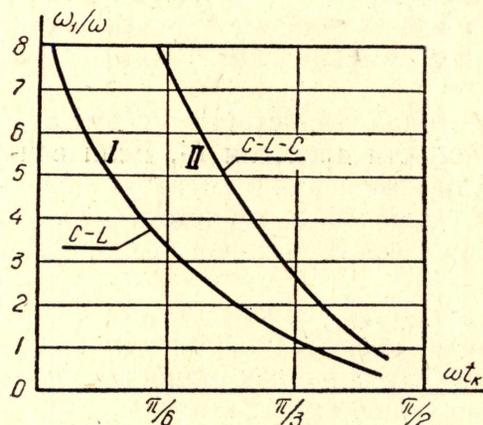


Рис. 2. Зависимость изменения угла коммутации тока от соотношения частот силового и коммутирующего контура: 1 — при отдельных зарядных индуктивностях коммутирующих конденсаторов, 2 — при общей зарядной индуктивности

Экспериментальная проверка схемы проводилась на электромагните бетатрона с частотой следования 50 *имп/сек* и энергией магнитного поля $3 \cdot 10^3$ *дж*. Максимальное значение тока электромагнита составляло 1020 *а*. В качестве управляемых коммутирующих приборов использованы тиристоры ТЛ2-200-8, имеющие время восстановления $100 \cdot 10^{-6}$ *сек*. Угол коммутации тока тиристоров регулировался в пределах 30 ÷ 85 *эл. град*. Собственная частота силового контура 45 *гц*. Запасаемая энергия в коммутирующих конденсаторах и зарядной индуктивности при угле коммутации 75 *эл. град* составляет 15% от энергии накопительного конденсатора C_1 . При этом 12% этой энергии за время коммутации тока поступает в поле электромагнита, за счет чего происходит форсирование поля при максимальном значении, а 3% энергии остается в зарядной индуктивности. За время формирования спада тока в электромагните эта энергия поступает в накопительный конденсатор. В случае использования высокочастотных тиристоров типа ТЧ со временем восстановления порядка $5 \cdot 10^{-6}$ *сек*, энергия, запасаемая в коммутирующей цепи, составит около 1% энергии накопительного конденсатора. В рассмотренной схеме возможно осуществлять подзаряд коммутирующих конденсаторов от отдельного источника питания. В этом случае, наряду с форсировкой магнитного поля, обеспечивается и ввод энергии для компенсации потерь контура. В схеме возможно использовать для целей смещения электронов элементы коммутирующей цепи, например, можно подключить последовательно с диодами D_3 и D_4 обмотки смещения.

Средние значения токов тиристоров и диодов в рассматриваемой схеме практически равны между собой и могут быть определены при импульсах квазитреугольной формы как

$$I_{cp} = \frac{I_m}{\pi} (1 - \cos \omega t_k) \cdot t_n \cdot N, \quad (6)$$

где

ωt_k — угол коммутации тока тиристоров,
 t_n — длительность импульса тока электромагнита,

N — число импульсов в секунду.

Максимальное напряжение, прикладываемое к тиристорам и диодам (T_1, T_2, D_1, D_2), равно амплитудному напряжению накопительного конденсатора, а мощность коммутирующих приборов T_1 или D_1 , необходимая для коммутации энергии магнитного поля, равной Q_M , определим как

$$P = \frac{4 \cdot Q_M \cdot \omega t_k \cdot N}{\pi(1 + \cos \omega t_k)}, \quad (7)$$

а общая мощность управляемых приборов схемы равна $4P$.

В настоящее время отечественной промышленностью освоено производство таблеточных тиристоров и диодов, позволяющих коммутировать мощности до 10^6 вт. Применение таких тиристоров в схемах питания сильноточных бетатронов позволит двумя тиристорами (T_1, T_2 , рис. 1) коммутировать энергию $5 \cdot 10^3$ дж при 200 имп/сек. Применение высокочастотных тиристоров типа ТЧ со временем восстановления $5 \cdot 10^{-6}$ сек позволит создавать схемы питания бетатронов на энергии 200 дж при $(2 \div 3) \cdot 10^3$ импульсов ускорения в секунду.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Генератор однополярных импульсов тока треугольной и трапецидальной формы. ПТЭ, № 5, 1966.
2. «Научные труды». М., Изв. РИАН СССР, т. 9, 1967.
3. В. В. Ивашин. Экономичная тиристорная схема питания электромагнита бетатрона. В сб. «Электронные ускорители». Вып. 3, Атомиздат, 1970.
4. В. В. Ивашин, Э. Г. Фурман. Экспериментальное исследование потерь в схеме питания бетатрона однополярными импульсами. Изв. ТПИ, т. 212, изд-во ТГУ, 1971.
5. Э. Г. Фурман. Стабилизация энергии колебательного контура ускорителя. ПТЭ, № 5, 1971.