

**СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО И КОНДЕНСАТОРНОГО
ВАРИАНТОВ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА
СИНХРОТРОНА ТПИ НА 1,5 ГЭВ**

И. П. Чучалин

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Для заданной реактивной энергии $Q_m = 880 \cdot 10^3$ дж, импульсного режима работы с частотой повторения циклов 1—2 гц и длительности импульса тока в обмотках электромагнита $\tau = 0,084$ сек практически наиболее подходящими являются два способа импульсного питания электромагнита синхротрона ТПИ на 1,5 Гэв:

- 1) от батареи конденсаторов (электрическое накопление энергии);
- 2) от вращающегося генератора с большим моментом инерции ротора или дополнительным маховиком (механическое накопление энергии).

Рассмотрим кратко и сравним каждый из указанных способов импульсного питания электромагнита. При сравнении стоимости систем питания электромагнита будем считать, что в случае питания от батареи конденсаторов стоимость системы питания в основном будет определяться стоимостью конденсаторов, в случае машинного питания — стоимостью генератора. Стоимость коммутирующей аппаратуры во всех случаях будет примерно одинакова, поэтому при сравнении учитываться не будет.

1. Питание электромагнита от батареи конденсаторов

Обычно батарея конденсаторов заряжается от выпрямителя и в определенные моменты времени через коммутирующие устройства разряжается на обмотки электромагнита, создавая в них импульс тока. Количество конденсаторов в батарее определяется запасаемой в них реактивной энергией

$$Q = \frac{CU_m^2}{2},$$

где C — емкость батареи конденсаторов;

U_m — максимальное значение напряжения на конденсаторах.

При импульсном питании электромагнита размеры батареи конденсаторов могут быть значительно сокращены по сравнению с размерами батареи конденсаторов при непрерывном питании. В табл. 1 приведены данные некоторых конденсаторов, выпускаемых нашей промышленностью [1]. Показателем размеров конденсаторной батареи, предназначенной для накопления одного и того же количества реактивной энергии, для различных типов конденсаторов служит удельная энергия. Из табл. 1 видно, что удельные энергии конденсаторов типа ИМ 3-100 и ИМ5-140,

Таблица 1

Тип	Назначение	Технические характеристики							Вес 1 шт, кг	Удельная энергия, Дж/см ³	Оптовая це- на в руб- лях и коп.
		Номин. на- пряжение, кв	Емк., мкф	Мощн. реакт. номин., квар	габариты в мм						
					основание		высота				
					длина	ширина	с изоля- цией	без изо- ляции			
КМ1-0,22	Для улучшения коэфф. мощности	$\sqrt{2}$.0,22	285	4,35	370	130	450	360	30	0,8	12—00*
КМ2-3,15		$\sqrt{2}$.3,15	8,08	25	310	140	925	800	60	2,3	3—05*
КМ1-6,3		$\sqrt{2}$.6,3	0,96	12	370	130	537	360	28	2,2	3—25*
КМ1-10,5		$\sqrt{2}$.10,5	0,39	13,5	370	130	572	360	28	2,5	3—25*
ИМ3-100	Для питания	3	100		380	110	445	370	25	29,0	40—00**
ИМ5-140	имп. ус-	5	140		310	138	920	850	62	48,0	92—00**
ИМ3-230	тановок	3	230		310	138	920	850	62	28,5	92—00**

Примечание: * — оптовая цена за квар;
** — оптовая цена за штуку.

которые могут быть использованы в импульсных схемах питания, равны соответственно 29 и 48 дж/дм³, а удельные энергии конденсаторов типа КМ, которые обычно используются в схемах непрерывного питания, равны 0,8—2,5 дж/дм³. Из сравнения указанных двух типов конденсаторов видно, что при импульсном режиме работы батарея конденсаторов может иметь габариты в 12—60 раз меньше, чем при непрерывном питании.

При использовании в схеме питания электромагнита синхротрона ТПИ на 1,5 Гэв конденсаторов типа ИМ 3-100 их общее количество должно составить

$$N = \frac{Q_m}{Q_1} = \frac{880 \cdot 10^3}{450} = 1960 \text{ штук,}$$

где $Q_1 = 450$ дж — энергия, запасаемая в одном конденсаторе ИМ 3-100. Стоимость батареи конденсаторов при этом будет:

$$C_{\text{бк}} = C_1 N = 40 \cdot 1960 \approx 80 \text{ тыс. руб.}$$

2. Питание электромагнита от вращающегося генератора

Возможно два вида питания электромагнита ускорителя от вращающегося генератора:

- а) включение генератора непосредственно на электромагнит;
- б) использование генератора с выпрямителем-инвертором. Рассмотрим указанные варианты в отдельности.

а. Включение генератора непосредственно на электромагнит

Прежде чем начать рассмотрение возможных вариантов питания электромагнита от вращающихся электрических машин заметим, что мы будем рассматривать возможности применения типовых электрических генераторов, выпускаемых промышленностью. Для создания мощных импульсных магнитных полей могут быть использованы ударные генераторы. Но так как ударные генераторы в настоящее время промышленностью серийно не выпускаются — они только разрабатываются и исследуются в научных лабораториях [2—7 и др.], нет возможности для их экономического сравнения с типовыми электрическими машинами.

При включении генератора непосредственно на электромагнит более целесообразно применение генератора переменного тока (обычно однофазного), чем постоянного тока, так как при работе с последним возникают дополнительные трудности, связанные с наличием коллектора [8, 9]. Кроме того, на одну и ту же мощность генераторы переменного тока дешевле генераторов постоянного тока, имеют меньшие габариты и позволяют легче осуществлять переключение тока после того, как ускоряющий цикл закончен и магнитное поле спадает.

Включение электромагнита должно производиться при прохождении напряжением нулевого значения. После включения электромагнита энергия, запасенная во вращающихся массах генератора, устремляется в электромагнит, скорость вращения генератора уменьшается. С момента времени, когда напряжение меняет свой знак, ток течет в прежнем направлении, запасенная в электромагните энергия, за исключением потерь, возвращается генератору, скорость последнего увеличивается. Отключение электромагнита происходит при прохождении током нулевого значения.

От генератора потребляется мощность, идущая на покрытие только активных потерь энергии. Мощность приводного двигателя определяется активными потерями мощности в электромагните ускорителя и в генераторе. Реактивная энергия, поступающая в электромагнит от генератора, определяется как

$$Q = \frac{1}{2} J (\omega_{\text{max}}^2 - \omega_{\text{min}}^2), \quad (1)$$

где $J = \frac{1}{4} GD^2$ — момент инерции ротора,

GD^2 — маховой момент;

ω — круговая скорость вращения ротора.

Из формулы (1) видно, что выгодно применять генератор с утяжеленным ротором (с дополнительным маховиком) и особенно с большой скоростью его вращения. Очень сильное изменение скорости вращения ротора вызывает большие механические колебания агрегата. Допускается снижение скорости на некоторую долю, обычно не более 10%.

Возможности получения реактивной энергии от электрической машины определяются техническими возможностями создания ротора с большим маховым моментом и большой скоростью вращения. От генератора может быть получена импульсная мощность во столько раз больше соответствующей номинальной мощности непрерывного режима, во сколько раз импульсный ток может быть увеличен по сравнению с соответствующим номинальным током непрерывного режима.

В обычных генераторах допустимая перегрузка определяется из условий нагрева и механической прочности генератора. Коммутируемая мощность $P_k = I_m U_m$ связана с энергией соотношениями [10]:

$$P_k = \frac{2\pi}{\tau} Q, \quad (2) \quad \text{— для импульса тока синусоидальной формы,}$$

$$P_k = \frac{4}{\tau} Q, \quad (3) \quad \text{— для импульса тока треугольной формы;}$$

где τ — длительность импульса тока.

При непосредственном включении генератора на электромагнит наибольшая длительность импульса получается при наименьшем числе полюсов генератора (два) и зависит от числа оборотов

$$\tau = \frac{\pi}{\omega}.$$

Стремление увеличить длительность импульса тока с целью уменьшения коммутируемой мощности приводит к снижению числа оборотов генератора. Снижение же числа оборотов пропорционально снижает мощность генератора. Таким образом, для получения широких импульсов тока требуются мощные генераторы. В этом недостаток непосредственного включения генератора на электромагнит.

Подсчитаем, какой необходим генератор при его непосредственном включении на электромагнит синхротрона на 1,5 Гэв. При синусоидальной форме импульса тока коммутируемая мощность будет равна

$$P_k = \frac{2\pi}{\tau} Q = \frac{2\pi}{0,084} \cdot 880 \cdot 10^3 = 66 \text{ мва.}$$

Из условий нагрева номинальный ток генератора при непрерывном режиме должен быть равен эффективному току при импульсном режиме

$$I_n = I_{\text{эф}},$$

где

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} \quad \text{— номинальный ток при непрерывном режиме,}$$

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{T}} \quad \text{— эффективный ток при импульсном режиме;}$$

T — период между началами цикла.

При выборе генератора необходимо учесть, что для получения импульса тока с заданной длительностью необходимо скорость вращения ротора уменьшить в

$$n = 2f\tau \text{ раз,} \quad (5)$$

где f — номинальная частота напряжения генератора.

При снижении числа оборотов ротора соответственно уменьшится напряжение генератора

$$U_r = U_m = \frac{\sqrt{2} U_H}{n} = \frac{U_H}{\sqrt{2} f\tau}. \quad (6)$$

Решая совместно (2), (4) и (6), получим

$$P_H = P_k f\tau \sqrt{\frac{\tau}{T}}. \quad (7)$$

Подставляя соответствующие численные значения, найдем необходимую мощность однофазного генератора

$$P_{HO} = 66 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 0,084 \sqrt{\frac{0,084}{0,5}} = 110 \text{ мвт.}$$

На такую мощность наша промышленность однофазных синхронных генераторов не выпускает. Поэтому приходится выбирать трехфазный синхронный генератор. Так как у трехфазного синхронного генератора будут использоваться только две фазы, мощность генератора должна быть

$$P_{HT} = \sqrt{3} \cdot P_{HO} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^6 = 190 \text{ мвт.}$$

Стоимость турбогенератора типа ТВВ-200-2 мощностью 200 мвт с возбудителем ВГТ-2700-500 и газоохладителем составляет 518 тыс. руб. [11], т. е. в 6,5 раз более стоимости батареи конденсаторов.

б. Питание электромагнита от вращающегося генератора с выпрямителем-инвертором

В данном варианте схемы питания электромагнита обычно используются генераторы переменного тока, которые в определенный момент времени через ионные преобразователи включаются в цепь намагничивающей обмотки. Здесь используется большое количество полуволн генератора, а не одна, как при непосредственном включении генератора на магнит. Коммутирующие приборы на фронте импульса тока отпираются только при положительных полуволнах напряжения, на спаде импульса тока — при отрицательных полуволнах напряжения.

В выпрямительном режиме (фронт импульса тока) энергия поступает от генератора в электромагнит, обороты генератора падают. В инверторном режиме (спад импульса тока) энергия, запасенная в обмотке электромагнита, отдается обратно машине, которая в этот момент времени работает как двигатель. Обороты машины растут, и энергия вновь накапливается для следующего цикла.

Для импульса тока треугольной формы коммутируемая мощность равна

$$P_k = \frac{4}{\tau} Q = \frac{4}{0,084} \cdot 880 \cdot 10^3 = 42 \text{ мва.}$$

В ускорителях, электромагниты которых питаются от моторгенераторов с выпрямителем-инвертором, номинальная мощность генераторов принята примерно равной максимальной коммутируемой мощности (см. табл. 2). Если для рассматриваемого синхротрона выбирать генератор также из этого условия, то его мощность должна быть равна 40—50 мвт. Стоимость синхронных генераторов, в частности, турбогенераторов типа ТВС-30 мощностью 30 мвт и типа ТВ-60-2 мощностью 60 мвт составляет соответственно 132,0 и 209,0 тыс. руб. [11].

Таблица 2

Ускоритель, место расположения	Максим. энергия, Гэв	Максим. ком. мощн., Мва	Мощность генерат., Мвт	Литерату- ра
Синхрофазотрон ОИЯИ, Дубна, СССР	10	140	4×37=148	[12]
Синхрофазотрон ИТЭФ, Москва, СССР	7	25	37,5	[13]
Синхрофазотрон ИФВЭ, Серпу- хов, СССР	70	96	4×37=148	[14]
Синхрофазотрон Брукхейвен, США	3	26	21	[15]
Синхрофазотрон «Nimrod», Англия	7	118	2×60	[16]
Синхрофазотрон, Женева, ЦЕРН	28	32	27	[17]

Если для питания электромагнита синхротрона ТПИ на 1,5 Гэв даже выбрать турбогенератор ТВС-30, то стоимость схемы питания составит не менее 132,0 тыс. руб., т. е. в 1,7 раза дороже стоимости конденсаторного варианта питания электромагнита.

В табл. 3 приведены технические данные и данные о стоимости некоторых турбогенераторов, выпускаемых нашей промышленностью [11].

Таблица 3

Тип турбогенератора	Технические данные		Вес с воз- будителем, т	Цена за ге- нератор с возбуд. и газоохлажд., т. руб.
	мощность, Мвт	напряже- ние, кв		
ТВ-0,75-2	0,75	3,15/6,3	8,27	14,6
Т2-Б-1,5-2	1,5	3,15/6,3	10,4	17,2
Т2-2,5-2	2,5	3,15/6,3	16,0	23,4
Т2-4-2	4,0	3,15/6,3	19,5	27,8
Т2-6-2	6,0	3,15	29,3	34,0
Т2-12-2	12,0	10,5	40,0	59,0
ТВС-30	30,0	10,5	70,0	132,0
ТВ-60-2	60,0	10,5	151,7	209,0
ТВФ-100-2	100,0	10,5	182,4	380,0
ТВВ-165	150,0	18,0	225,0	476,0
ТВВ-200-2	200,0	15,75	245,3	518,0
ТВВ-320-2	300,0	20,0	382,3	746,0

На рис. 1 приведены зависимости стоимости накопления 1 Дж энергии в электрических машинах с выпрямителем-инвертором и в конденсаторной батарее от величины запасаемой энергии. При расчетах принималась максимальная коммутируемая мощность равной номинальной мощности генераторов ($P_K = P_H$). Величина накопленной в генераторе энергии для импульса тока в нагрузке треугольной формы определялась по формуле $Q = \frac{\tau P_H}{4}$. Стоимость 1 Дж накопленной в турбогенераторе энергии определялась как

$$C_{1 \text{ Дж}} = \frac{C_{\text{ТГ}}}{Q},$$

где $C_{\text{ТГ}}$ — стоимость турбогенератора.

Зависимости стоимости 1 Дж накопленной в электрических машинах энергии на рис. 1 представлены для трех значений длительности

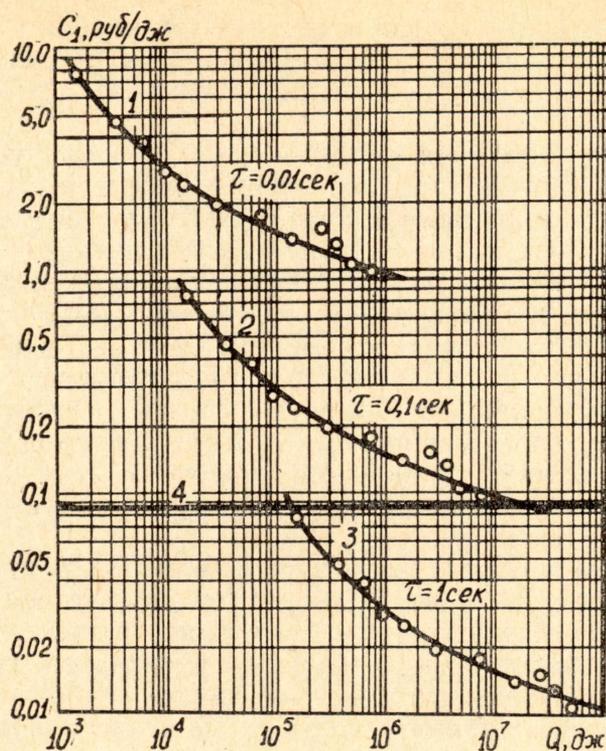


Рис. 1. Зависимости стоимости накопления 1 дж энергии в электрических машинах с выпрямителем-инвертором (1—3) и в конденсаторной батарее (4) от величины запасаемой энергии.

импульса тока в обмотках электромагнита: 0,01, 0,1 и 1,0 сек. Приблизительно в таком диапазоне изменяются длительности импульсов тока в электромагнитах ускорителей.

Стоимость накопленной энергии в конденсаторах от величины энергии и длительности импульсов тока в электромагните не зависит. В расчетах мы ориентировались на импульсные конденсаторы ИМ 3-100, в каждом из которых можно запасти энергию 450 дж. При цене конденсатора ИМ 3-100 40 руб. [1]. Стоимость 1 дж, запасаемого в таких конденсаторах, составляет $C_{1дж} = 0,089$ руб/дж.

Из рис. 1 видно, что электромашинный вариант питания электромагнитов ускорителей с экономической точки зрения оказывается выгодным при больших значениях энергий, запасаемых в магнитном поле ускорителей (свыше 10^7 дж при $\tau = 0,1$ сек и свыше 10^5 дж при $\tau = 1$ сек).

Кроме стоимости оборудования при выборе варианта схемы питания электромагнита необходимо учитывать и другие факторы, а именно, условия работы системы питания как надежной энергетической установки, особенно условия ускорения заряженных частиц.

Схемы питания ускорителей должны создавать магнитное поле, периодически возрастающее от нуля до максимального значения и повторяющееся от цикла к циклу с заданной точностью и стабильностью. В магнитном поле ускорителя нежелательны временные гармонические составляющие, близкие к частоте синхротронных колебаний ускоряемых частиц, и пространственные гармонические составляющие азимутальной асимметрии поля, близкие к частоте бетатронных колебаний частиц. От схемы питания электромагнита ускорителя обычно требуется возможность снижения и регулирования скорости нарастания магнитного

поля во время инжекции частиц в камеру ускорителя. Это необходимо как для уменьшения искажений магнитного поля за счет влияния вихревых токов, так и для подбора оптимальных условий захвата частиц в ускорение.

Работа системы питания электромагнита мощного ускорителя обычно сопровождается периодическим накоплением и расходом электрической энергии, величина которой существенно больше необратимых потерь энергии. Поэтому при создании систем питания мощных ускорителей предусматривают осуществление рекуперации энергии и исключение загрузки питающей энергетической системы реактивной мощностью.

При выборе того или иного варианта системы питания электромагнита необходимо учитывать также условия эксплуатации системы питания. При электромашинном варианте питания необходимо учитывать значительную стоимость машинных залов с мощными фундаментами под машины, необходимость применения кранового оборудования, наличие вибрации фундаментов и здания, необходимую более высокую квалификацию обслуживающего персонала.

Указанные выше требования проще всего удовлетворяются системами питания электромагнитов ускорителей от батарей конденсаторов.

Все циклические электронные ускорители, в электромагнитах которых запасается сравнительно небольшая реактивная энергия по сравнению с протонными ускорителями и которые работают с короткими длительностями тока электромагнита, в качестве накопителей энергии используют батареи конденсаторов.

Для синхротрона ТПИ на 1,5 Гэв также принято питание электромагнита от батарей конденсаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прейскурант № 15-08 оптовых цен на конденсаторы бумажно-масляные, бумажно-соловьевые и установки конденсаторные. Прейскурантгиз, М., 1967.
2. Г. А. Сипайлов. Основные вопросы электромашинного генерирования и коммутации больших импульсных мощностей. Диссертация, ТПИ, Томск, 1965.
3. К. А. Хорьков. Вопросы проектирования генератора ударной мощности. Диссертация, ТПИ, Томск, 1964.
4. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Мощность, энергия и машинная постоянная ударного генератора, Изв. ТПИ, 132, 1965.
5. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Удельная энергия ударного генератора. Изв. ТПИ, 132, 1965.
6. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору основных размеров ударного генератора. Изв. ТПИ, 132, 1965.
7. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору обмотки ротора ударного генератора. Изв. ТПИ, 138, 1965.
8. P. Kariza. Proc. Roy. Soc., A, 115, p. 658 (1927).
9. L. Riddiford. Proc. Phys. Soc., 64, № 375B, part 3, p. 218 (1951).
10. Г. И. Димов. Разработка электромагнита синхротрона без железных полюсов. Диссертация, ТПИ, 1954.
11. Прейскурант № 15-02 оптовых цен на машины электрические большой мощности, турбогенераторы и компенсаторы синхронные. Прейскурантгиз, М., 1967.
12. М. А. Гашев, Е. Г. Комар и др. Система питания электромагнита синхротрона ОИЯИ. «Электричество», 1960, № 1.
13. Н. А. Моносзон, А. М. Столов и др. Система питания электромагнита протонного синхротрона на 7 Гэв. ПТЭ № 4, 27, 1962.
14. В. В. Владимирский, Е. Г. Комар и др. Основные характеристики проектируемого ускорителя протонов на 50—60 Гэв с жесткой фокусировкой. «Атомная энергия», 1956, № 4.
15. G. K. Green and E. E. Shelton. Kosmotron, R.S.I., 9, 24, 1953.
16. Gev proton synchrotron „Nimrod“ of the Rutherford High Energy Laboratory, Chilton, Didcot, Berkshire, NIRL/R/44 1965.
17. E. Regenstreif. The CERN proton synchrotron, CERN 59—29, Proton Synchrotron Division, Geneva, 21 st August 1959.