

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА
КАК НАГРУЗКИ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

Л. М. АНАНЬЕВ, С. Г. ЧЕРНЫШЕВА

(Представлена научным семинаром кафедры промышленной электроники)

Введение

Переносные малогабаритные бетатроны на невысокие энергии до 6 мэв используются для целей дефектоскопии заготовок и изделий из различных материалов, в радиационной терапии злокачественных опухолей, для исследований в химии, биологии и других областях.

Однако поскольку бетатроны в настоящее время уже не являются уникальными приборами, а фактически выпускаются сериями, практикой настойчиво выдвигается требование уменьшения габаритов и повышения их эффективности.

В этом направлении ведутся работы по применению новых качественных марок трансформаторной стали, совершенствованию конструкции электромагнита, а также разработке эффективных методов охлаждения бетатронов и новых конструкций высоковольтных инжекторов. Все это позволило разработать конструкцию переносного малогабаритного бетатрона, очень удобного для дефектоскопии.

Кроме того, в целях увеличения выхода тормозного излучения создаются новые типы бетатронов, работающих на повышенной частоте. Требованию минимального веса и экономичности отвечает выбор наиболее оптимального режима работы электромагнита с максимальной нагрузкой стали магнитопровода, т. е. рабочая точка выбирается на изгибе кривой намагничивания.

Это условие накладывает некоторые ограничения при выборе и расчете схемы питания электромагнита бетатрона. Ввиду значительной индуктивности обмотки электромагнита питание ее переменным током связано с низким значением $\cos\varphi$. Для повышения $\cos\varphi$ используется резонансная схема питания обмоток. Эта схема включает намагничивающие обмотки, в цепь которых параллельно вводится компенсационный конденсатор. Емкость конденсаторов подбирается так, чтобы собственная частота полученного колебательного контура равнялась частоте питающего тока. Особенностью этого контура является нелинейный характер индуктивности.

При повышении эффективности работы переносных бетатронов за счет использования повышенной частоты и стабилизации питающего напряжения их питание производится от преобразователей и устройств с ограниченной выходной мощностью. Поэтому изменение режима работы контура, связанное с нелинейностью его элементов и высокой избирательностью, при изменении частоты, формы и величины напряжения питания может привести к появлению реактивной составляющей

тока через источник. В результате установленная мощность преобразующего устройства увеличится, а режим его работы нарушится.

Общие свойства линейного контура электромагнита бетатрона

Схема питания электромагнита бетатрона показана на рис. 1, где I_1 , U_1 — ток и напряжение на первичной обмотке электромагнита, I_2 , U_2 — соответственно — на вторичной, L — индуктивность электромагнита бетатрона, C — компенсационная емкость.

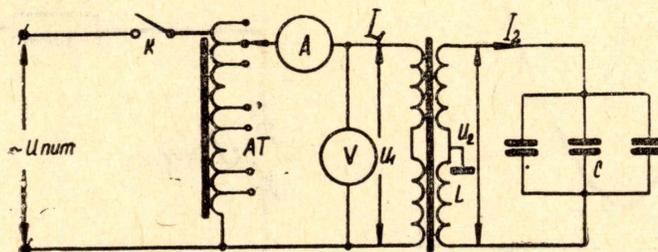


Рис. 1. Схема питания электромагнита бетатрона

В схеме бетатрона параллельный контур подключен к выходной цепи преобразователя частоты.

При расчете контура для простоты внутренним сопротивлением источника питания можно пренебречь, т. е. примем, что $R_i \ll Z_{0e}$, где

R_i — внутреннее сопротивление источника,
 Z_{0e} — эквивалентное сопротивление контура.

В этом случае можно считать, что напряжение генератора действует на зажимах контура.

$$U_2 = \kappa_3 U_1,$$

где κ_3 — коэффициент трансформации обмоток электромагнита.

Поскольку напряжение на зажимах контура не зависит от частоты питающего напряжения (без учета индуктивности рассеяния), индикатором настройки резонансного контура может служить поведение тока в питающей цепи

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{0e}} = I_1 / \kappa_3, \quad (1)$$

$$|Z_{0e}| = \frac{R_{0e}}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \quad (2)$$

$$\xi = Q\gamma = 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_c}, \quad (3)$$

где R_{0e} — комплексное значение эквивалентного сопротивления контура при резонансе,

$\frac{\Delta\omega}{\omega_c}$ — относительная расстройка контура,

ω_c — частота питающего напряжения,

Q — добротность контура.

Тогда с учетом (2) и (3) выражение (1) запишется как

$$I_2 = \frac{U_2}{R_{0e}} \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_c}\right)^2} \quad (4)$$

или

$$I_2 = I_p \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_c}\right)^2}. \quad (5)$$

Эта зависимость описывает уравнение резонансной кривой по току (рис. 2).

Формула (5) позволяет оценить перегрузку источника питания при изменении частоты питающего напряжения $\Delta\omega$ и добротности контура Q , и тем самым определить требуемую стабильность частоты.

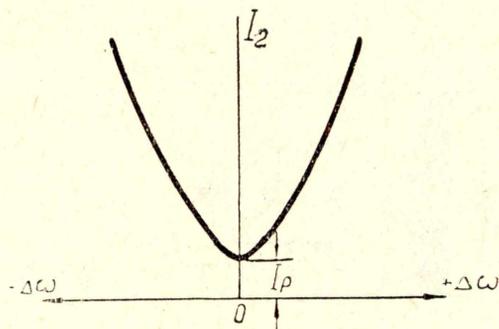


Рис. 2. Эквивалентная схема питания электромагнита с учетом внутреннего сопротивления источника питания

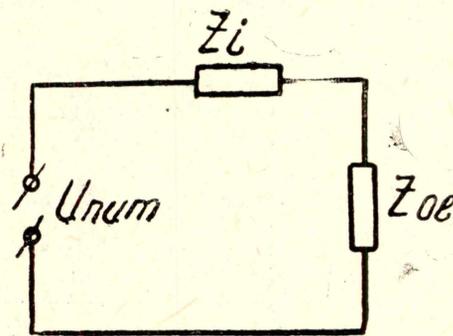


Рис. 3. Резонансная кривая параллельного контура

В случае ограниченной мощности источника, имеющего некоторое сопротивление Z_i , при изменении частоты будет происходить и изменение напряжения на электромагните.

Действительно, в соответствии с рис. 3

$$U_2 = \kappa_э \frac{U_1}{Z_i + Z_{0e}} \cdot Z_{0e},$$

$$U_2 = \kappa_э \frac{U_1}{1 + \frac{Z_i}{Z_{0e}}}. \quad (6)$$

При чисто активном внутреннем сопротивлении это выражение записывается как

$$U_2 = \kappa_э \frac{U_1}{1 + \frac{R_i}{R_{0e}} \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_c}\right)^2}}. \quad (7)$$

Нелинейность контура электромагнита бетатрона

В связи с применением ферромагнитного магнитопровода индуктивность намагничивающих обмоток изменяется при изменении напряжения питания.

Необходимо оценить, как будет изменяться мощность, подводимая к контуру, в зависимости от напряжения питания. При этом нужно учитывать нелинейный характер изменения индуктивности, так как из соображений максимальной загрузки магнитопровода и минимального веса прибора рабочая индуктивность электромагнита выбирается на границе линейного участка, близкого к насыщению.

Для решения поставленной задачи необходимо найти аналитическое выражение для $\mu_{эф}$ эффективной магнитной проницаемости, т. е.

аналитическое выражение для кривой намагничивания $H = f(B)$. Для этого необходимо аппроксимировать последнюю.

Существует очень много способов аппроксимации и аналитического выражения кривой намагничивания.

Представим последнюю в виде

$$H = \kappa B^p$$

или

$$H = H_0 \left(\frac{B}{B_0} \right)^p, \quad (8)$$

где

H_0 и B_0 — амплитудное значение напряженности и индукции, принятые за базовые при аппроксимации кривой;

B — текущая координата индукции;

p — коэффициент, определяемый методом постепенного подбора до наилучшего совпадения расчетной кривой с экспериментальной;

B_p — здесь и в дальнейших расчетах амплитудное значение рабочей индукции в стали магнитопровода при номинальном режиме.

Наиболее рационально принять $p = 5$. Тогда

$$H = H_0 \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^5. \quad (9)$$

При нелинейном характере изменения индуктивности L в расчеты необходимо ввести значение эффективной индуктивности $L_{эф}$, что, конечно, вносит некоторую погрешность, но является вполне оправданным с точки зрения упрощения расчетов и рационального применения математического аппарата.

$$L_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T L^2 dt}, \quad (10)$$

где L — мгновенное значение индуктивности при изменении питающего напряжения за период, определенное по расчетной схеме электромагнита (рис. 4).

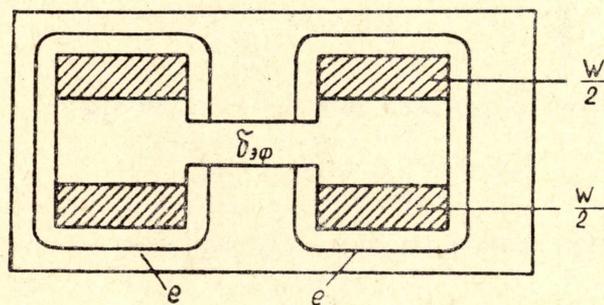


Рис. 4. Расчетная схема электромагнита

$$L = \frac{\omega \Phi}{I} = \frac{\omega^2 S B_p \sin \omega t}{F} \cdot 10^{-8}.$$

При наличии воздушного зазора магнитодвижущая сила

$$F = 0,8 \delta_{эф} B + HI,$$

тогда

$$L = \omega^2 s \frac{B_0 \sin \omega t}{0,8 \delta_{\text{эф}} B_p \sin \omega t + H(t) l}, \quad (11)$$

где

ω — число витков намагничивающей обмотки (витки),
 s — поперечное сечение магнитопровода (см^2),
 $\delta_{\text{эф}}$ — величина эффективного воздушного зазора (см),
 B_p — максимальное значение индукции (гс),
 l — средняя длина силовой линии (см),
 H — величина напряженности магнитного поля электромагнита (а/см), определяется согласно формуле (9),

Таким образом, заменяя $H(t)$ согласно (9) и произведя некоторые преобразования, имеем

$$L = \frac{\omega^2 s}{0,8 \delta_{\text{эф}} \left(1 + \frac{H_0 l B^4}{0,8 \delta_{\text{эф}} B_0^5} \sin^4 \omega t \right)} \cdot 10^{-8}.$$

Если обозначить $L_0 = \frac{\omega^2 s}{0,8 \delta_{\text{эф}}} \cdot 10^{-8}$ — начальная индуктивность электромагнита, то

$$L = L_0 \frac{1}{1 + \frac{H_0 l}{B_0 0,8 \delta_{\text{эф}}} \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^4 \sin^4 \omega t}. \quad (12)$$

Для упрощения записи введем коэффициент

$$m = \frac{H_0 l}{B_0 0,8 \delta_{\text{эф}}},$$

тогда

$$L = L_0 \frac{1}{1 + m \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^4 \sin^4 \omega t}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (10), имеем

$$L_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{L_0^2}{\left[1 + m \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^4 \sin^4 \omega t \right]^2} dt}. \quad (14)$$

Производя соответствующие действия, получим

$$L_{\text{эф}} = L_0 \left[1 - 3/8 m \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^4 \right].$$

Для сокращения записи введем коэффициент

$$\kappa = \frac{0,37 m}{B_0^4},$$

тогда

$$L_{\text{эф}} = L_0 (1 - \kappa B_p^4). \quad (15)$$

Или, переходя к напряжению питания,

$$L_{\text{эф}} = L_0 (1 - \kappa U^4). \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) показывают, соответственно, зависимость изменения индуктивности электромагнита бетатрона от напряжения питания и индукции.

Теперь можно определить изменение тока в питающей цепи контура бетатрона I_2 в зависимости от изменения индуктивности этого контура, которая в свою очередь является функцией напряжения питания U_2 (при условии $L_{\text{рассеяния}} = \text{const}$), т. е. найдем $I_2 = f(U_2)$.

Как известно, $I_2 = \frac{U_2}{Z_{0e}}$ или, переходя к проводимостям,

$$I_2 = U_2 Y = U_2 (y_{0e} + jy_L - jy_c),$$

где

$$y_L = \frac{1}{\omega_c L} \text{ — индуктивная проводимость,}$$

$$y_c = \omega_c C \text{ — емкостная проводимость,}$$

$$y_{0e} = \frac{1}{R_{0e}} \text{ — проводимость контура при резонансе.}$$

При резонансе индуктивное и емкостное сопротивления равны $1/\omega_c L_p = \omega_c C$, отсюда $C = \frac{1}{\omega_c^2 L_p}$, тогда

$$I_2 = \frac{U_2}{R_{0e}} + jU_2 \left(\frac{1}{\omega_c L} - \frac{1}{\omega_c^2 L_p} \right).$$

Подставляя в эту формулу значение для L из (16) и производя некоторые преобразования, окончательно имеем

$$I_2 = \frac{U_2}{R_{0e}} \left(1 - jQ\kappa \frac{U_0^4 - U_2^4}{1 - \kappa U_2^4} \right). \quad (17)$$

Формула (17) совместно с формулой (15) позволяет оценить перегрузку источника питания резонансного параллельного контура при колебаниях частоты и величины напряжения питания.

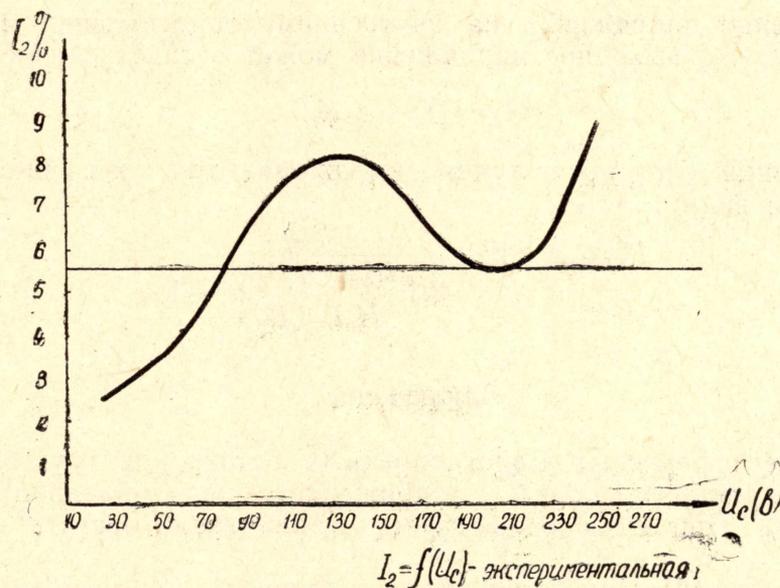


Рис. 5. Вольтамперная характеристика параллельно-резонансного контура (экспериментальная).

Учитывая внутреннее сопротивление источника питания, можно оценить возможность использования параметрического метода стабилизации выходного напряжения U_2 при изменении питающего напряжения U_c по аналогии с феррорезонансными стабилизаторами.

При изменении напряжения сети ток I_2 в питающем резонансный контур проводе будет изменяться по закону, описываемому уравнением (17) рис. 6. Однако при этом будет соответствующим образом ме-

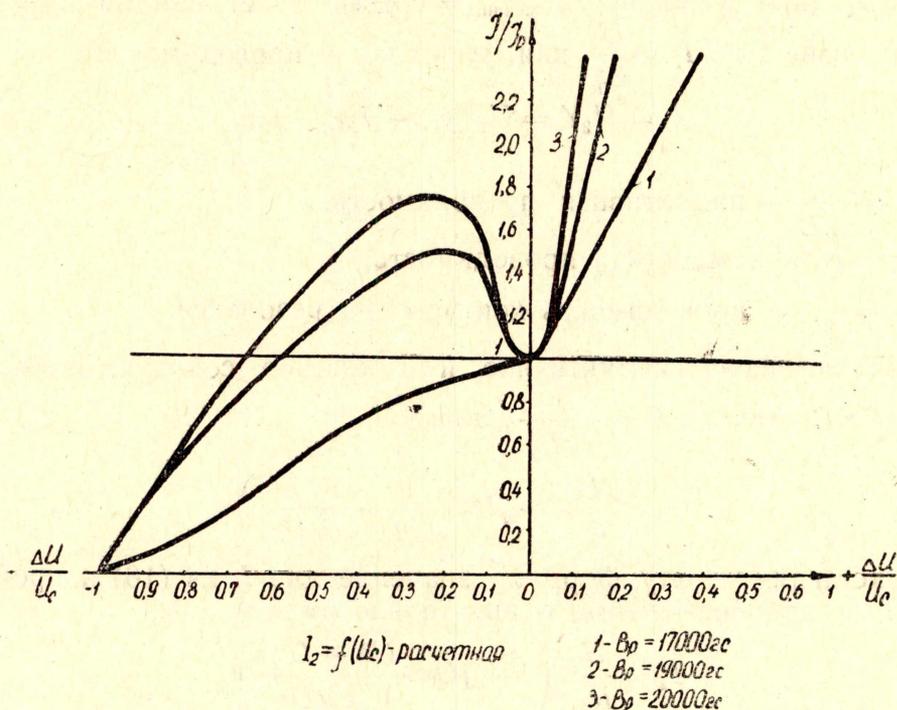


Рис. 6. Вольтамперные характеристики параллельного резонансного контура (расчетные)

няться падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника питания так, что выходное напряжение может оставаться постоянным.

$$U_2 = U_c - I_2 Z_i.$$

Для такой системы получено выражение для коэффициента стабилизации в виде

$$K_{\text{ст. max}} = 1 + \frac{2Q}{2,1 \frac{B_6 \delta_{\text{эф}}}{H_6 l} \left(\frac{B_6}{B_p} \right)^4 - 1}. \quad (18)$$

Заключение

Питание переносных малогабаритных бетатронов осуществляется переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты $50 \text{ гц} \pm 0,2\%$. При этом особой схемы стабилизации частоты не требуется.

Однако при питании бетатронов напряжением повышенной частоты, т. е. от преобразователей частоты, требуется стабильность последней не меньше 1% , так как в противном случае установленная мощность будет меняться больше, чем на 25% . Это приведет к излишнему весу преобразователя, так как удельный вес источников питания на полупроводниковых $\sim 15 \text{ кг/кВА}$.

Введение же в схему источника стабилизирующего звена при наличии задающего генератора увеличит вес весьма незначительно.

Изменение величины напряжения питания приводит к значительному увеличению установленной мощности источника питания бетатрона в связи с нелинейностью резонансного контура.

Как показывает расчет, для бетатрона ПМБ-5 при изменении напряжения на 10% ток источника питания может изменяться ~ на 40% за счет нелинейной индуктивности резонансного контура, а без учета нелинейности только за счет изменения напряжения питания на 10% мощность источника питания изменится ~ на 20%.

Таким образом, за счет суммарного влияния расчетная мощность источника питания возрастет примерно в полтора раза, что при расчете на эту мощность резко увеличит вес прибора.

Кроме того, необходимость стабилизации величины напряжения питания определяется допустимым изменением интенсивности излучения бетатрона.

Если стабильность напряжения ~ 3%, то увеличение мощности источника без учета нелинейности будет 7%, а за счет нелинейности ~ 10%. Суммарное увеличение мощности будет не более 20%.

Как показали расчеты, для стабилизации напряжения источника питания при работе последнего на нелинейный резонансный контур может быть применен параметрический метод. При этом коэффициент стабилизации данной нелинейной системы значительно зависит от параметров магнитопровода и будет тем выше, чем больше добротность резонансного контура и чем выше рабочая индукция электромагнита бетатрона.

Необходимо отметить, что расчет велся на промышленную частоту 50 гц. При повышении частоты выходного напряжения источника питания до 400—500 гц для увеличения эффективности бетатрона допуски относительно стабильности напряжения остаются прежними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Индукционный ускоритель электронов-бетатрон. Госатомиздат, 1961.
2. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.
3. Л. А. Бессонов. Автоколебания в электрических цепях со сталью. Госэнергоиздат, 1958.
4. Б. К. Буль. Основы теории и расчета магнитных цепей. Изд. «Энергия». 1964.
5. И. С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы. Изд. «Сов. радио». 1964.
6. Б. П. Асеев. Колебательные цепи. Связьиздат. 1955.