

**ПРОСТАЯ СХЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ
В КИНЕТИЧЕСКУЮ**

В. В. ИВАШИН, И. М. ЧУРКИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических
машин и общей электротехники)

Импульсные магнитные поля находят широкое применение как в технике физического эксперимента, где их получением занимается большой круг инженеров, так и при создании установок, где электромагнитная энергия импульсами преобразуется в кинетическую энергию движения — электромолотки, молоты, быстродействующие электромагнитные приводы коммутирющей аппаратуры и т. д.

В последнее время наряду с электромагнитными получают все более широкое развитие и применение индукционно-динамические и электродинамические системы. В таких системах объем, занимаемый магнитным полем, формируется с помощью намагничивающих сил обмоток, которые могут выполняться в виде короткозамкнутых пластин из проводящего материала, колец и т. д. Такие системы позволяют использовать магнитные поля, напряженность которых значительно выше насыщения ферромагнетиков, что определяет время преобразования энергии, измеряемое величиной порядка $(0,5 \div 10) \cdot 10^{-3}$ сек.

Широкое применение в схемах питания таких преобразователей находят конденсаторные батареи, способные развивать мощности, необходимые при создании магнитного поля преобразователя. Эти мощности в десятки раз превосходят мощности питающей сети.

Типичная, широко применяемая схема импульсного питания, например индукционно-динамического преобразователя, приведена на рис. 1. Основной накопитель энергии — емкость C_H заряжается от источника питания, например выпрямителя, через ограничивающий зарядный дроссель L_3 . При поджиге коммутирующего прибора T_1 конденсатор C_H разряжается на обмотку L_H и закорачивается диодом D при возникновении на нем положительного напряжения. Замыкание тока

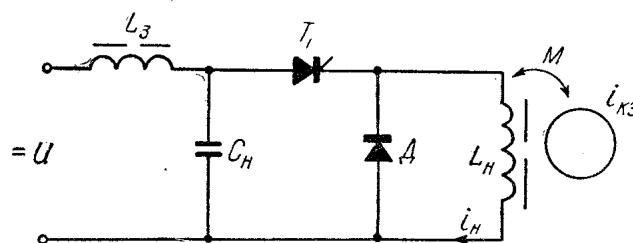


Рис. 1. Типичная схема питания импульсного индукционно-динамического преобразователя с закорачиванием.

в нагрузке накоротко при его максимальном значении исключает перезаряд емкости C_H до напряжения обратной полярности и обеспечивает в нагрузке улучшение условий преобразования энергии в кинетическую [1, 2].

В подобных схемах величина передаваемой от конденсатора C_H в нагрузку энергии может регулироваться в основном путем изменения напряжения на емкости, что требует управляемого выпрямителя. Возможно искусственное запирающее тиристора T_1 с помощью схем, широко применяемых при широтно-импульсном регулировании напряжения [3], но все они требуют обязательного использования управляемых коммутирующих приборов.

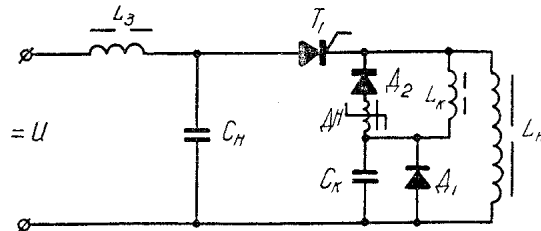


Рис. 2. Схема питания с частичным разрядом емкости

На рис. 2 показана схема, которая была нами исследована и применена для питания мощного индукционно-динамического преобразователя энергии. Схема позволяет в широких пределах регулировать момент запирающего тиристора T_1 без дополнительных управляемых приборов, что значительно увеличивает надежность схем питания и управления.

В ряде случаев регулирование момента запирающего тиристора требуется для улучшения процесса энергопреобразования. При отпирании тиристора T_1 емкость C_H начинает разряжаться на нагрузку L_H . Через индуктивность L_K происходит колебательный заряд коммутирующей емкости C_K . Параметры L_K и C_K выбраны так, что напряжение U_K на емкости C_K (рис. 2) в некоторый момент t_K становится больше напряжения U_{CH} частично разрядившейся емкости C_H (рис. 3). Диод D_2 в момент времени t_K открывается, и дроссель насыщения D_H начинает перематываться под действием разницы напряжений на емкостях C_K и C_H . К моменту t_2 он насыщается, его индуктивность уменьшается, и током разряда емкости C_K тиристор T_1 обесточивается и запирается. При разряде емкости C_K до нуля она закорачивается диодом D_1 . Однополярный режим работы конденсаторов C_H и C_K по напряжению позволяет применять энергоемкие импульсные или электролитические конденсаторы. Моменты открытия диода D_1 и запирающего тиристора T_1 в широком диапазоне могут регулироваться изменением величин индуктивности L_K или емкости C_K .

Анализ схемы и выбор ее параметров

При расчете схемы необходимо определить величины индуктивности L_K , емкости C_K и потокосцепления дросселя D_H , обеспечивающих заданный момент запирающего тиристора при известных величинах емкости C_H , максимального напряжения на ее зажимах U_m , а также нелинейной активно-индуктивной нагрузки L_H . Решение задачи в общем виде сопряжено со значительными трудностями, так как точный закон

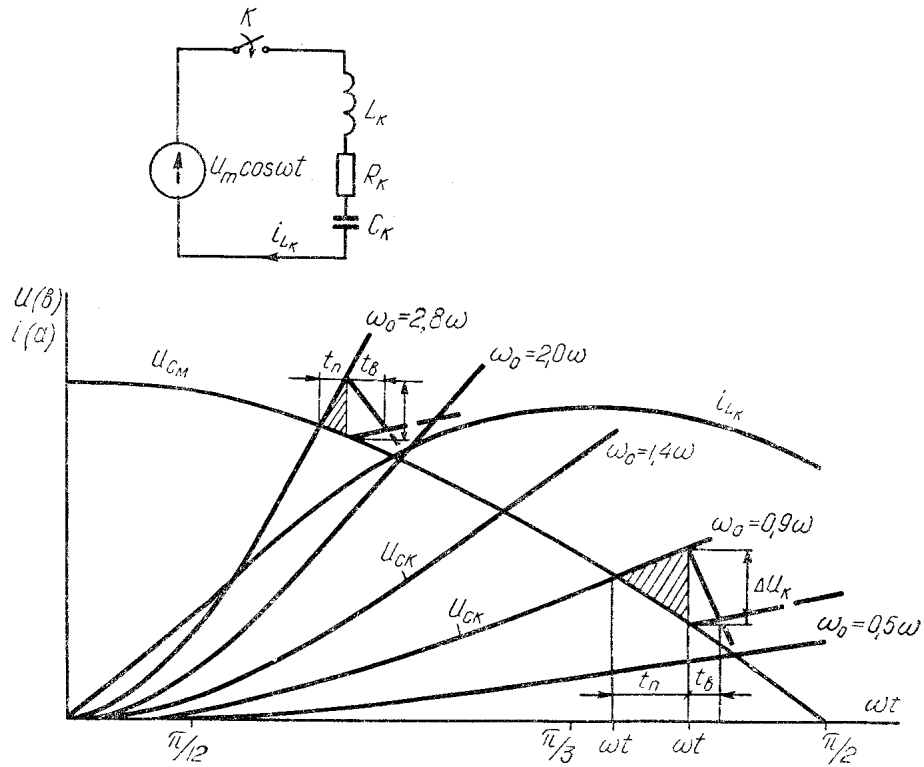


Рис. 3. Схема замещения цепи заряда (а) и кривые токов и напряжений в схеме питания (б)

изменения параметров активно-индуктивной нагрузки, определяемый нелинейным характером энергопреобразования, обычно неизвестен. Сравнительно простое и во многих практических случаях достаточно точное решение этой задачи имеет при аппроксимации напряжения на емкости C_H косинусоидальной функцией

$$u_{CH} = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где ω — собственная частота контура $C_H L_H$.

Такое допущение справедливо по той причине, что переходящая из емкости C_H в контур $L_K C_K$ энергия значительно меньше полной энергии накопительного конденсатора C_H , а индуктивность L_H за время заряда емкости C_K изменяется мало, не более, чем на 5÷10%. Заряд емкости C_K обычно хорошо удовлетворяет условию колебательности, поэтому дополнительно можно пренебречь активными сопротивлениями этого контура и уравнение процесса заряда будет иметь вид

$$u_{LK} + u_{CK} = U_m \cos \omega t, \quad (2)$$

где u_{LK} и u_{CK} — падения напряжения на индуктивности L_K и емкости C_K .

Параметры коммутирующего контура для заданной частоты ω_0 выбираются из условия обеспечения разности напряжения ΔU_K и приемлемых значений емкости и индуктивности.

Из принципа работы схемы следует, что энергия емкости C_K полезно используется в процессе преобразования, а энергия индуктивности L_K рассеивается в виде тепла, поэтому предпочтение следует отдавать большим значениям емкости. Из (2) можно определить напряжение на емкости C_K и ток ее заряда

$$u_{CK} = U_m \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} (\cos \omega_0 t - \cos \omega t), \quad (3)$$

$$i_{CK} = U_m \frac{\omega_0^2 C_K}{\omega^2 - \omega_0^2} (\omega \sin \omega t - \omega_0 \sin \omega_0 t), \quad (4)$$

где ω_0 — частота контура $L_K C_K$.

На рис. 3 показан характер изменения напряжения u_{CK} при различных значениях ω_0 . Из совместного решения (1) и (3) можно получить уравнение, связывающее частоту ω_0 и момент t_K :

$$\cos \omega t_K - n \cos \omega_0 t_K = 0,$$

$$\text{где } n = \frac{\omega_0}{\omega}.$$

При известном t_K из него нетрудно определить соответствующее ему значение ω_0 и затем выбрать параметры L_K и C_K .

Характерной величиной, необходимой для определения параметров дросселя насыщения, является момент времени t_2 , когда напряжение на коммутирующей емкости становится больше мгновенного значения на емкости C_H на величину ΔU_K , необходимую для надежного обеспечения тиристора T_1 и его запираания.

$$\Delta U_K \approx \frac{t_{\text{восст}}}{C_K} I_m \sin \omega t_K, \quad (5)$$

где $t_{\text{восст}}$ — время восстановления управляющих свойств тиристора.

ΔU_K можно выразить как

$$\Delta U_K = u_{CK} - u_{CH}. \quad (6)$$

С учетом выражений (1) и (3) из (6) получим

$$\Delta U_K = U_m \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} (\cos \omega_0 t_2 - \cos \omega t_2) - U_m \cos \omega t_2, \quad (7)$$

откуда для любых значений ω , ω_0 и ΔU_K нетрудно определить t_2 .

В общем виде время t_2 при заданной величине n определяется решением тригонометрического уравнения:

$$n^2 \cos \omega_0 t_2 - \cos \omega t_2 = \frac{\Delta U_K}{U_m} (1 - n^2).$$

Необходимая для нормальной работы схемы питания величина потокосцепления дросселя определяется величиной заштрихованной на рис. 3 площади, заключенной между линией u_{CH} и линиями u_{CK} , построенными из условия обеспечения момента коммутации при угле ωt_K .

$$\Psi = \int_{t_K}^{t_2} [u_{CK}(t) - u_{CH}(t)] dt = \frac{U_m \cdot \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \left[\frac{1}{\omega_0} (\sin \omega_0 t_2 - \sin \omega_0 t_K) - \right. \\ \left. - \frac{1}{\omega} (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_K) \right] - \frac{U_m}{\omega} (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_K). \quad (8)$$

Наибольшее потокосцепление дроссель насыщения имеет при угле коммутации $0,5\pi$. Учитывая, что в области углов $\omega t_K \approx 0,5\pi$ косинусоидальную функцию изменения напряжения u_{CH} можно заменить прямой

$$u_{CH} = -U_m \omega t, \quad (10)$$

максимальное значение потокосцепления дросселя можно определять по формуле:

$$\Psi_m = \frac{\Delta u_K^2}{2U_m \omega}. \quad (11)$$

Условие $\omega t_k = 0,5\pi$ соответствует схемному решению, когда $C_k \rightarrow \infty$, $C_k \rightarrow \infty$, что практически можно получить путем параллельного присоединения к нагрузке цепочки из дросселя насыщения и диода. Коммутация тока тиристора T_1 в этом случае осуществляется путем разряда на него перезарядившейся до напряжения минус ΔU_k емкости C_n . При $\omega t_k \approx 0,5\pi$ не обеспечивается однополярный режим работы по напряжению конденсатора C_n . Такой режим обеспечивается при $\omega t_k < \frac{\pi}{2}$.

Величина дросселя насыщения с уменьшением угла ωt_k также уменьшается.

Если к моменту t_k индуктивность нагрузки за счет энергопреобразования существенно изменилась по сравнению с ее начальным значением, то аппроксимация напряжения u_{cn} по (1) будет давать значительную ошибку. В этом случае потокосцепление дросселя можно определить по средним значениям токов через емкости C_n и C_k , определенных с учетом изменения индуктивности L_n или из осциллограмм тока в цепи, полученных в реальной установке или на аналоговой вычислительной машине.

Из принципа работы схемы следует, что после запираания тиристора T_1 в цепь нагрузки оказывается включенной вместо емкости C_n емкость $C_k \ll C_n$, которая быстро разряжается и закорачивается диодом D_1 . Энергия, запасенная в емкости C_k , после запираания тиристора T_1 передается в магнитное поле и может полезно использоваться при энергопреобразовании. Энергия, запасенная в индуктивности L_k , после насыщения дросселя Д. Н. выделяется на активных сопротивлениях обмоток индуктивности L_k и дросселя.

Для лучшего использования магнитопровода дросселя насыщения его можно подмагничивать током нагрузки, током заряда емкости или током от внешнего источника.

Схема импульсного получения магнитного поля была испытана в режиме работы на индуктивную нагрузку с постоянной и переменной индуктивностью с параметрами: $U_m = 400$ вольт, $C_n = 30 \cdot 10^{-3}$ ф,

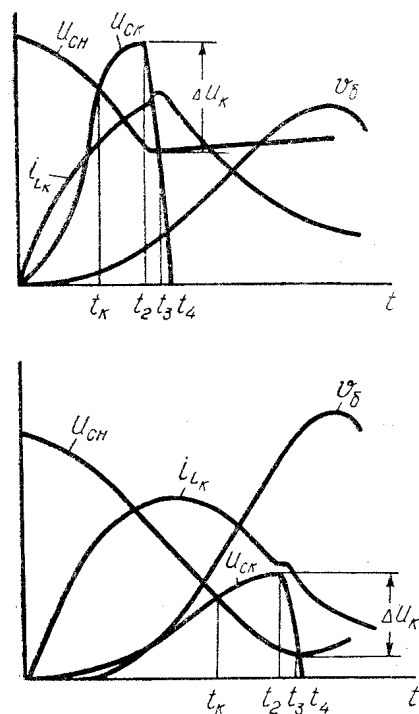


Рис. 4. Осциллограммы процессов в схеме питания при угле коммутации 40° (а) и 80° (б) периода основного контура

$C_k = 2 \cdot 10^{-3}$ ф. Длительность импульса тока в нагрузке составляла $(10 \div 15) \cdot 10^{-3}$ сек. Вес дросселя насыщения не превышал 3 кг. Амплитуда тока в обмотке L_n при постоянной индуктивности 1000 а, а при переменной — 720 а.

Нагрузка выполнена в виде индуктора индукционно-динамического преобразователя энергии, вес бойка которого равен 100 кг, а общий вес с индуктором 400 кг. На осциллограммах рис. 4, а, б показаны кривые изменения напряжений на накопительном и коммутирующем конденсаторах и тока нагрузки при угле коммутации $\sim 40^\circ$ (а) и 85° (б) частоты контура ω . Схема позволила регулировать в широких пределах энергию, передаваемую из накопительного конденсатора в нагрузку. Максимальная скорость бойка 1,44 м/сек на осциллограмме рис. 4, а и 2,7 м/сек на осциллограмме рис. 4, б. Коэффициент преобразования энергии емкости C_n в кинетическую (к. п. д.) при различных режимах работы имеет значение $(25 \div 30) \%$.

Выводы

1. Схема работает на электролитических конденсаторах и позволяет без применения дополнительных управляемых коммутирующих приборов коммутировать ток нагрузки при частичном разряде накопительной емкости. Изменение угла коммутации ωt_k позволяет простым путем и в широких пределах регулировать величину энергии, вводимую в нагрузку, и таким образом изменять мощность электромеханического преобразователя.

2. Стоимость и размеры вспомогательных элементов цепи искусственной коммутации — индуктивности L_k , емкости C_k и дросселя ДН — составляют незначительную часть от стоимости и размеров основной емкости C_n даже при длительности импульса тока до $20 \cdot 10^{-3}$ сек. При более длительных импульсах тока возможность схемы ограничивается величиной коммутирующего дросселя ДН.

3. Применение схемы возможно в любых системах электромеханического преобразователя электромагнитных, электродинамических, индукционно-динамических и т. п.), когда по обмоткам необходимо пропускать импульсные токи.

4. Проведенный анализ работы схемы и полученные формулы позволяют правильно определить все основные параметры элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smart D. L. Proc. Inst. Electrical Engs., A-106, suppl N 2, 1959.
2. Rogers. Proc Inst. Electrical Engs., vol 116, N 1, 1969.
3. И. Н. Крайцберг, Э. В. Шикуть. Импульсные методы регулирования цепей постоянного тока с помощью тиристорov. М., «Энергия», 1969.
4. В. В. Ивашин, Э. Г. Фурман. Экспериментальное исследование потерь в конденсаторах типа ИМ-3/100. Труды НИИ ЯФ, вып. 1, М., Атомиздат, 1971.