

## 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 коммутирующей 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

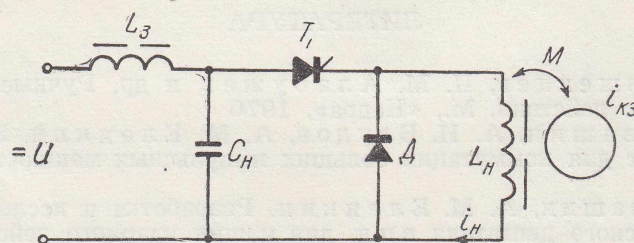


Рис. 1. Типичная схема питания импульсного индукционно-динамического преобразователя с закорачиванием.

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.

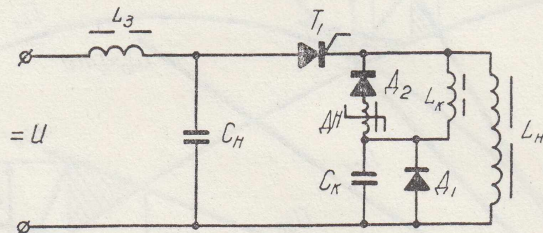


Рис. 2. Схема питания с частичным разрядом емкости

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 разности напряжений на емкостях  $C_K$  и  $C_H$ . К моменту  $t_2$  он насыщается, его индуктивность уменьшается, и ток 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

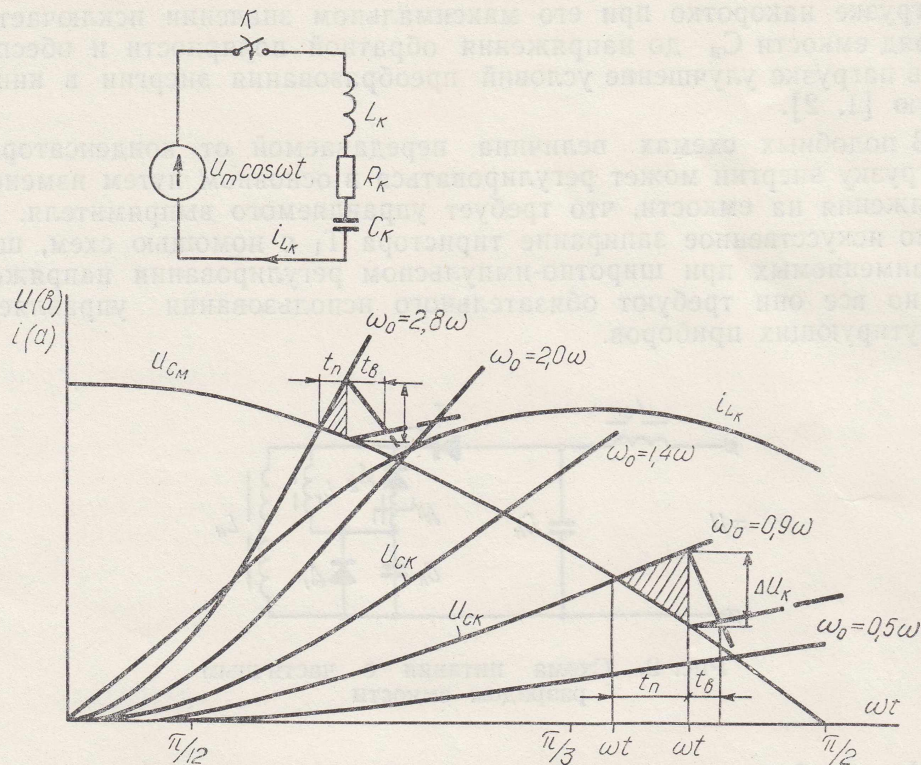


Рис. 3. Схема замещения цепи заряда (а) и кривые токов и напряжений в схеме питания (б)

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

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

где  $\omega$  — 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  $\omega_0$  выбираются из условия обеспечения разности напряжения  $\Delta U_K$  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

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

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

где  $\omega_0$  — частота контура  $L_K C_K$ .

На рис. 3 показан характер изменения напряжения  $u_{СК}$  при различных значениях  $\omega_0$ . Из совместного решения (1) и (3) можно получить уравнение, связывающее частоту  $\omega_0$  и момент  $t_K$ :

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

где  $n = \frac{\omega_0}{\omega}$ .

При известном  $t_K$  из него нетрудно определить соответствующее ему значение  $\omega_0$  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  $\Delta U_K$ , 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.

$\Delta U_K$  можно выразить как

$$\Delta U_K = u_{СК} - u_{СН}. \quad (6)$$

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  $\omega$ ,  $\omega_0$  и  $\Delta U_K$  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  $u_{СН}$  и линиями  $u_{СК}$ , построенными из условия обеспечения момента коммутации при угле  $\omega t_K$ .

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

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  $u_{СН}$  можно заменить прямой

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

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  $C_k \rightarrow \infty$ ,  $C_n \rightarrow \infty$ , 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  $\Delta U_k$  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  $\omega t_k$  также уменьшается.

Если к моменту  $t_k$  индуктивность нагрузки за счет энергопреобразования существенно изменилась по сравнению с ее начальным значением, то аппроксимация напряжения  $u_{сн}$  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  $D_n$  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,

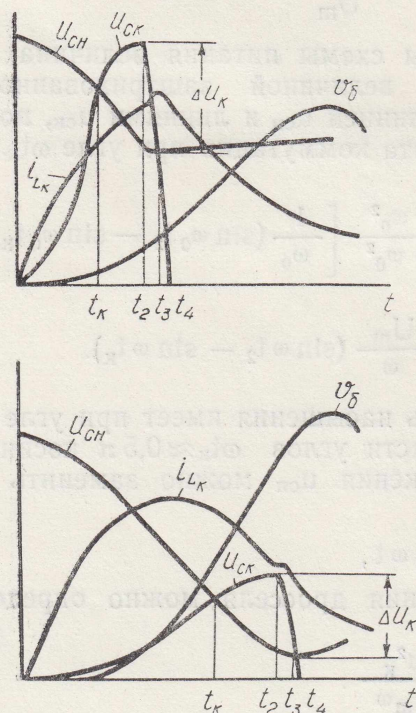


Рис. 4. Осциллограммы процессов в схеме питания при угле коммутации  $40^\circ$  (а) и  $80^\circ$  (б) периода основного контура

$C_k = 2 \cdot 10^{-3} \text{ ф}$ . Длительность импульса тока в нагрузке составляла  $(10 \div 15) \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ . 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  $85^\circ$  (б) частоты контура  $\omega$ . 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  $\omega t_k$  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  $20 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ . 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. Rogens. 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.