

УСКОРЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА НАРАСТАНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

В. САРВ,

кандидат технических наук

Существование переходных процессов в природе вызвано тем, что преобразование энергии из одного вида в другой происходит всегда с какой-то ограниченной мощностью и поэтому связано с затратой времени.

Вследствие тесной связи между электрическими и магнитными явлениями в электромагнитных переходных процессах нарастание энергии магнитного поля происходит за счет потребляемой электрической энергии, а убывание магнитного поля всегда связано с генерированием электрической энергии.

Скорость нарастания магнитного потока при включении заданной электромагнитной нагрузки (например, обмотки возбуждения или управления) определяется:

- а) развиваемой источником питания мощностью,
- б) коэффициентом полезного действия (к.п.д.) процесса преобразования потребляемой электрической энергии в энергию магнитного поля.

Скорость убывания магнитного поля определяется скоростью преобразования энергии магнитного поля в какой-либо другой вид энергии. В существующих схемах управления электромагнитными устройствами энергия убывающего магнитного поля преобразуется в основном в тепло, что практически исключает возможность дальнейшего использования этой энергии в последующих электромагнитных процессах.

До настоящего времени описано большое количество методов и конкретных схем для ускорения электромагнитных переходных процессов, в частности для ускорения нарастания магнитного потока. Переходный процесс определен преобразованием различных видов энергии по времени. Поэтому для систематизации существующих способов ускорения электромагнитных переходных процессов и в особенности для выяснения возможных новых методов ускорения следует считать целесообразным рассмотрение энергетики электромагнитных переходных процессов.

В статье рассматривается связь между ускорением и энергетикой электромагнитных переходных процессов при включении активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение.

По итогам рассмотрения энергетики переходных процессов предлагаются также некоторые новые принципы дальнейшего увеличения скорости нарастания магнитного потока.

Включение линейной активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение

Рассмотрим энергетическое протекание переходного процесса при включении схемы рис. 1. Для большей наглядности применяем относительные величины, принимая за единицу напряжение питания U , установившийся ток $I = U : R$ и промежуток времени, равный постоянной времени цепи, $T = L : R$. В этом случае единицами являются также индуктивность L , активное сопротивление R и мощность P , развиваемая источником питания в установившемся режиме. Строчными буквами обозначаем относительные значения мощностей (p), тока (i), падения напряжения (u) и времени (t).

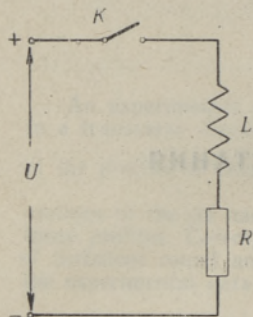


Рис. 1. Рассматриваемая цепь с активно-индуктивной нагрузкой.

С учетом вышеуказанного, переходный процесс при замыкании выключателя K описывается следующими формулами:

ТОК

$$i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = 1 - e^{-t};$$

активное падение напряжения

$$u_R = Ri = 1 - e^{-t};$$

индуктивное падение напряжения

$$u_L = L \frac{di}{dt} = e^{-t};$$

мощность, развиваемая источником питания,

$$p = Ui = 1 - e^{-t};$$

мощность тепловых потерь

$$p_R = u_R i = (1 - e^{-t})^2;$$

полезная мощность, соответствующая той части электрической энергии, которая преобразуется в энергию магнитного поля,

$$p_L = u_L i = e^{-t} - e^{-2t};$$

мгновенный к.п.д. преобразовательного процесса

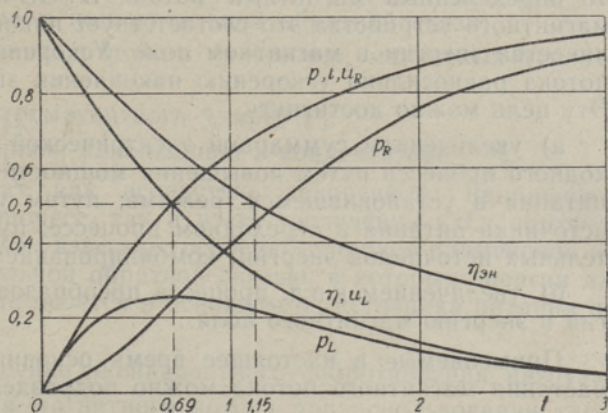
$$\eta = \frac{p_L}{p} = \frac{u_L}{U} = e^{-t};$$

энергетический к.п.д.

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{\int_0^t p_L dt}{\int_0^t p dt} = \frac{0,5(1 - e^{-t})^2}{t + e^{-t} - 1}.$$

Характеристики протекания переходного процесса в относительных единицах изображены на рис. 2, из которого наглядно видны основные недостатки естественного, т. е. до конца экспоненциального, переходного процесса, которые способствуют увеличению длительности нарастания магнитного потока:

Рис. 2.
Протекание переходного процесса при включении активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение.



а) мощность, развиваемая источником управления в начале переходного процесса, значительно меньше его номинальной мощности;

б) к.п.д. процесса преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля высок только в начале нарастания магнитного потока.

Экспоненциальный переходный процесс считается практически оконченным при $t = 3$ и, соответственно, $i = 0,95$. В этот момент энергия, накопленная в магнитном поле,

$$W'_L = \int_0^3 p_L dt = 0,45,$$

а энергия, израсходованная источником питания,

$$W' = \int_0^3 p dt = 2,05.$$

Для сравнения напомним, что при выбранных единицах энергия магнитного поля при установившемся токе $I = 1$ равняется

$$\frac{LI^2}{2} = 0,5.$$

Соответственно при $t = 3$ энергетический к.п.д.

$$\eta'_{\text{эн}} = \frac{W'_L}{W'} = 0,219.$$

Таким образом, при нефорсированном, до конца экспоненциальном переходном процессе только примерно $\frac{1}{5}$ из потребляемой электрической энергии преобразуется в энергию магнитного поля, остальная же часть преобразуется в тепло.

Существующие способы ускорения нарастания магнитного потока

В конце переходного процесса в сердечнике устанавливается какой-то определенный магнитный поток. В случае конкретного электромагнитного устройства это соответствует накоплению определенного количества энергии в магнитном поле. Ускорение нарастания магнитного потока равносильно ускорению накопления энергии в магнитном поле. Эту цель можно достигнуть

- а) увеличением суммарной электрической мощности во время переходного процесса путем повышения мощности, развиваемой источником питания в установившемся режиме; путем улучшения использования источника питания в переходном процессе; путем применения дополнительных источников энергии; комбинированием перечисленных методов;
- б) увеличением к.п.д. процесса преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля.

Применяемые в настоящее время основные методы ускорения нарастания магнитного потока можно подразделить на четыре группы.

1. Постоянное увеличение напряжения источника питания с одновременным увеличением сопротивления включаемой цепи.

В таких схемах с постоянным напряжением питания ускорение переходного процесса происходит за счет увеличения расхода энергии и соответственно установившейся мощности источника питания, но в случае применения нелинейных добавочных сопротивлений, полупроводниковых триодов [1] и при шунтировании добавочного сопротивления во время переходного процесса ускорение происходит также вследствие улучшения к.п.д. преобразовательного процесса. Хотя такие схемы очень просты, их недостатком является увеличение тепловых потерь, увеличение мощности и габаритов источника питания, а также уменьшение коэффициента усиления управляемого устройства.

Когда нагрузку питают через выпрямитель от источника переменного напряжения, то добавочное сопротивление может быть включено в участок переменного тока и соответственно являться реактивным. В этом случае не происходит существенного увеличения тепловых потерь. В литературе рассмотрены схемы с индуктивным добавочным сопротивлением [2]. Наряду с этим также возможно применение емкостного добавочного сопротивления, так как независимо от характера реактивного сопротивления падение напряжения на реактивном сопротивлении возникает и растет вместе с увеличением тока во включаемой цепи.

2. Периодическое или однократное увеличение напряжения питания на ограниченный промежуток времени без увеличения активного сопротивления включаемой цепи.

Сюда относятся схемы с импульсным питанием [3] и схемы форсирования путем повышения напряжения на время переходного процесса. Ускорение нарастания магнитного потока происходит прежде всего за счет увеличения к.п.д. преобразовательного процесса. Объясняется это

тем, что энергия, соответствующая нужной величине магнитного потока, накапливается в магнитном поле уже в первой стадии экспоненциального переходного процесса, когда к.п.д. высок. Эти схемы с энергетической точки зрения экономичны и поэтому находят широкое применение, например, в автоматизированном электроприводе. Но в большинстве случаев их применение связано с увеличением габаритов источника питания, так как габариты электромагнитных устройств заданной мощности зависят также от относительной величины максимального напряжения.

3. Применение наряду с источником управления еще дополнительных источников энергии.

Этот метод реализуется различными типами схем:

- а) схемы с применением положительной обратной связи;
- б) каскадное включение устройств (например, магнитных усилителей);
- в) применение «электромагнитного удара» [4];
- г) использование энергии, накопленной в конденсаторе [5, 6].

Ускорение происходит как вследствие ускоренного направления энергии в переходный процесс, так и из-за увеличения к.п.д. преобразовательного процесса. Как известно, особенно широкое применение находят схемы с положительной обратной связью, в которых энергия для создания магнитного поля берется в основном из источника питания нагрузочной цепи.

4. Временное уменьшение эквивалентного сопротивления нагрузки.

Ускорение нарастания магнитного потока при использовании таких схем связано с увеличением индуктивного падения напряжения на один виток. Это вызывает увеличение к.п.д. преобразовательного процесса и развиваемой источником питания мощности. Принципиально метод временного уменьшения эквивалентного сопротивления является прогрессивным, так как позволяет лучше использовать источник питания в переходном процессе и зачастую допускает ускорение переходного процесса без соответствующего увеличения номинальной мощности и габаритов источника питания. Однако недостатком применяемой схемы [7] для реализации этого метода путем временного шунтирования одной части витков является появление короткозамкнутого контура, который увеличивает расход энергии в переходном процессе. Этот недостаток становится особенно заметным при частом срабатывании электромагнитного устройства.

Мы классифицировали возможные способы ускорения нарастания магнитного потока в случае управления уже заданным электромагнитным устройством. Но если заданным является только выходная мощность или какое-либо другое выходное воздействие, то ускорению переходного процесса может способствовать еще применение качественных материалов, выбор оптимальной конструкции и увеличение частоты питания нагрузочной цепи. С энергетической точки зрения эти мероприятия увеличивают отношение выходной мощности к энергии, накопленной в электромагнитном устройстве.

Некоторые возможности дальнейшего увеличения скорости нарастания магнитного потока

Переходный процесс почти всегда можно ускорить до желаемого предела путем увеличения расхода энергии при создании управляющего магнитного поля. Но это связано с увеличением габаритов источников управления, уменьшением коэффициента усиления управляемого устройства, увеличением тепловых потерь или потребностью в дополнительных источниках питания. Кроме того, зачастую мощность источника управления ограничена.

Поэтому целесообразно достигнуть требуемое быстродействие электромагнитного устройства прежде всего

а) созданием оптимальной конструкции, обеспечивающей нужное выходное воздействие при наименьшей энергии управляющего магнитного поля;

б) выбором таких схем форсирования, которые основаны на улучшении к.п.д. процесса преобразования, а также на более совершенном использовании источника управления, но не требуют существенного повышения установившейся мощности и габаритов источника управления.

Считаем, что электромагнитное устройство уже задано и ограничиваемся случаями, когда управляющее магнитное поле создается в основном за счет энергии источника управления.

Если можно устранить возникновение короткозамкнутого контура, то при непериодических включениях одним из наиболее целесообразных следует считать ускорение временным уменьшением эквивалентного сопротивления нагрузки. Это возможно путем применения в существующей схеме [7] дополнительного вентиля В (рис. 3). Вентиль В следует выбрать, исходя из номинального тока обмотки и максимального обратного напряжения

$$u_{om} \leq U \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Нормально замкнутый контакт РТ открывается при достижении магнитным потоком заданной величины.

Некоторым недостатком простейшей схемы на рис. 3 является то, что во время переходного процесса в создании магнитодвижущей силы участвует только обмотка ω_1 . Вследствие этого для достижения номинальной величины магнитного потока ток в обмотке ω_1 должен превышать номинальный ток управления в $\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1}$ раз. В большинстве случаев как источники питания, так и обмотки управления допускают кратковременную токовую перегрузку, что и является большим преимуществом схем форсирования, использующих временное уменьшение эквивалентного сопротивления нагрузки.

Но можно построить схему форсирования и таким образом, чтобы во время переходного процесса в работе участвовали все части обмотки. Это уменьшило бы активное падение напряжения, а вместе с тем и тепловые потери во время переходного процесса. Для этого обмотка электромагнитного устройства разделяется на две или, в общем случае, на большее число равных частей — $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ (рис. 4), соединяемых последовательно через вентили B_1, B_2, \dots, B_{n-1} . В начале переходного процесса через нормально замкнутые контакты (например, реле тока РТ) части обмотки $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ соединены параллельно источнику

питания. Вследствие этого коэффициент форсировки $\alpha = n$. Реле РТ срабатывает при токе, равном установившемуся току обмотки после размыкания нормально замкнутых контактов. Тем самым переходный процесс заканчивается. Как известно, уже при коэффициенте форсировки $\alpha = 2$, что соответствует разделению обмотки на две равные части, достигается ускорение процесса нарастания магнитного потока примерно в 5—7 раз.

Когда управляющим устройством является реле или контактор, то вместо контактов дополнительного реле РТ можно использовать нормально замкнутые контакты управляемого устройства.

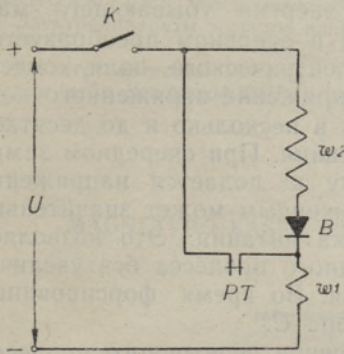


Рис. 3. Схема с вентилем В для устранения короткозамкнутого контура.

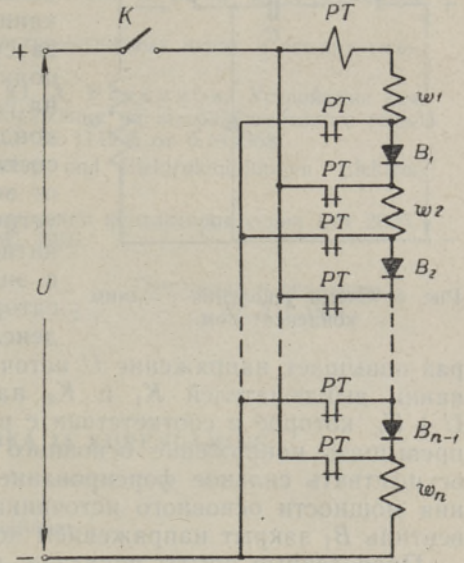


Рис. 4. Принципиальная схема форсирования с уменьшением эквивалентного сопротивления нагрузки в n^2 раз.

Можно получить бесконтактную схему форсировки путем замены нормально замкнутых контактов бесконтактными коммутирующими устройствами или конденсаторами соответствующей величины. Схема с ускоряющими конденсаторами при $n = 2$ изображена на рис. 5.

Электромагнитные устройства часто работают в режиме повторных включений и выключений. При включении электроэнергия, необходимая для создания магнитного поля, берется из источника управления, причем часто ограниченная мощность управления ограничивает скорость нарастания магнитного потока. Несмотря на это, при выключении энергия убывающего магнитного поля обыкновенно превращается просто в тепло. Как известно, ускорение нарастания магнитного потока сверх предела, определенного мощностью источника питания, возможно, если для создания необходимого магнитного поля одновременно с энергией основного источника управления использовать еще дополнительную энергию. Для получения такой дополнительной энергии предлагаем преобразовать энергию убывающего магнитного поля не в

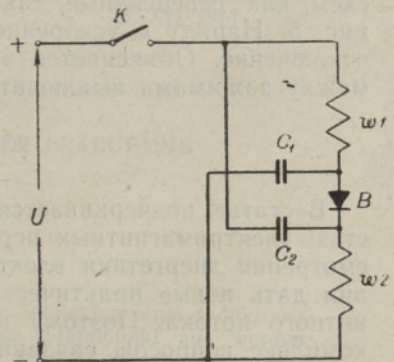


Рис. 5. Схема ускорения с двумя конденсаторами

тепло, а в какой-нибудь другой вид энергии, допускающий накопление и повторное использование накопленной энергии. Наиболее простым и довольно удобным является накопление энергии в электрическом поле конденсатора.

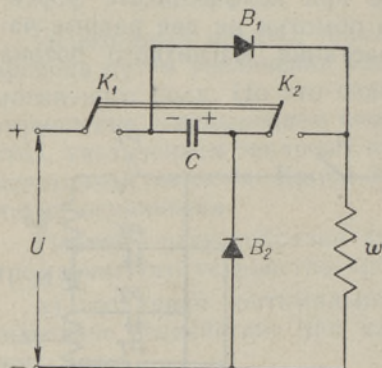


Рис. 6. Схема ускорения с одним конденсатором.

На рис. 6 приведена одна из возможных схем. При установившемся режиме обмотка управления w питается через выключатель K_1 и вентиль B_1 ; конденсатор C разряжен. После размыкания выключателей K_1 и K_2 конденсатор за счет энергии убывающего магнитного поля заряжается полярностью, указанной на рис. 6. При соответственно выбранном конденсаторе (вес которого обыкновенно составляет только несколько процентов от веса управляемого электромагнитного устройства) энергия убывающего магнитного поля в основном преобразуется в энергию электрического поля конденсатора, а напряжение заряженного конденсатора U_c в несколько и до десятков раз повышает напряжение U источника питания. При очередном замыкании выключателей K_1 и K_2 на обмотку w подается напряжение $U + U_c$, которое в соответствии с вышеизложенным может значительно превышать напряжение основного источника питания. Это позволяет осуществить сильное форсирование переходного процесса без увеличения мощности основного источника питания. Во время форсирования вентиль B_1 закрыт напряжением конденсатора C .

Проведенные опыты показали, что ускорение переходного процесса в десять и больше раз можно получить сравнительно легко. При этом из принципа работы схемы вытекает (что также подтверждается экспериментальной проверкой), что применение накапливающих и ускоряющих конденсаторов необходимо сочетать с предотвращением существенных вихревых токов в магнитопроводе.

Вышеописанная схема не является единственно возможной для реализации метода накопления и повторного использования энергии убывающего магнитного поля. Возможны различные другие разновидности схем, как реверсивные, так и нереверсивные, в том числе и схема на рис. 5. Наряду с ускорением такие схемы обеспечивают безыскровое отключение. Объясняется это отсутствием существенного напряжения между зажимами выключателя в первый момент после выключения.

Заключение

В статье подчеркивается тесная связь между энергетикой и скоростью электромагнитных переходных процессов. Уже первый этап рассмотрения энергетикой электромагнитных переходных процессов позволил дать новые практические методы для ускорения нарастания магнитного потока. Поэтому необходимо всесторонне рассмотреть весь комплекс вопросов, связанных с энергетикой электромагнитных переходных процессов. Особенно существенные практические результаты должно дать рациональное решение проблемы накопления и повторного использования энергии убывающего магнитного поля в устройствах, работающих в режиме повторного нарастания и убывания магнитного поля. Сюда относятся и устройства, управляемые реверсированием магнитного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Н. Фесенко, Об одном методе форсирования переходного процесса, Электричество, № 6, 1960.
2. В. Е. Боголюбов, В. Л. Дятлов, Снижение постоянной времени цепи управления электропривода, содержащего выпрямительный мост, Тр. Моск. энерг. ин-та, вып. 22, 1956.
3. В. А. Олейников, Работа магнитного усилителя в импульсной системе регулирования и управления. Изв. Ленингр. электротехн. ин-та им. В. И. Ульянова (Ленина), вып. XXXIV, 1958.
4. А. Д. Рабинович, Явление «удара» в электромагнитных цепях и его практическое применение, дисс. М., 1955.
5. Б. М. Шляпошников, А. Я. Рубин, Ю. А. Резников, Устройство для форсирования процесса установления напряжения на выходе шунтового генератора постоянного тока, авт. свид. СССР № 114905 от 6.10.1958.
6. R. Weber, Stosserregung von Elektromagneten und Elektrokupplungen, Elektro-Anzeiger, Nr. 3—4, 1960.
7. Л. А. Родштейн, Расширение области применения контакторов серии КМ 2000, Электроаппараты низкого напряжения, М., 1959.

*Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
25. XII 1961

MAGNETVOO KASVU ENERGEETIKA JA KIIRENDAMINE

V. Sarv,

tehnikateaduste kandidaat

Resümee

Artiklis analüüsitakse siirdeprotsessi energeetikat induktiivse aktiivkoormuse lülitamisel alalispingele. Lähtudes energeetilisest käsitlusest, liigitatakse tänapäeval kasutatavad magnetvoo kasvu kiirendamise meetodid ning esitatakse uusi otstarbekaid võimalusi magnetvoo kasvu kiirendamiseks.

Artikli eesmärgiks on rõhutada elektromagnetiliste siirdeprotsesside energeetika ja nende kulgemise kiiruse tihedat seost ning põhjendada laastavate uurimistööde süvendamise ning laiendamise vajadust.

*Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut*

Saabus toimetusse
25. XII 1961

DIE BESCHLEUNIGUNG UND ENERGETIK DER ERZEUGUNG
MAGNETISCHEN FLUSSES

V. Sarv

Zusammenfassung

Im Artikel wird die Energetik des Schaltvorganges beim Schliessen einer induktiven Wirklast auf Gleichspannung analysiert. Vom energetischen Standpunkt aus werden die heutigen Methoden für die Beschleunigung der Erzeugung magnetischen Flusses systematisiert und einige neue Beschleunigungsmassnahmen vorgeschlagen.

Aufgabe des Artikels ist, den engen Zusammenhang zwischen Energetik und Geschwindigkeit der elektromagnetischen Schaltvorgänge zu betonen.

*Institut für Energetik
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR*

Eingegangen
am 25. Dez. 1961