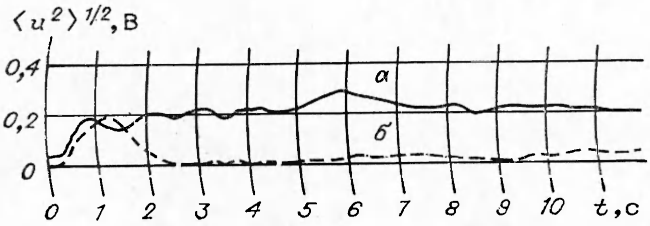

Рис. 5

профиля градиента плотности от исходного состояния и регистрировалась с помощью самописца.

Результаты проведенных исследований показали, что после завершения активной стадии движения длительное время наблюдается отличие вертикального профиля градиента плотности в среде от исходного. Стирание этого отличия происходит медленно, так как определяется процессами медленной адвекции и молекулярной диффузии. На рис. 5 приведены регистрограммы сигналов на выходе вольтметра среднеквадратичного значения при $\mathrm{Re} = 1300$ и $\mathrm{Fr} = 36{,}0$ (*а*) и при $\mathrm{Re} = 650$, $\mathrm{Fr} = 36{,}0$ (*б*). Следует отметить, что отличие вертикального профиля градиента плотности от фонового уровня $\langle u_0^2\rangle^{1/2}$ наблюдается и при значительно больших временах, чем те, которые прослеживаются на рис. 5. Так, для спутного течения, характеризуемого параметрами $\mathrm{Re} = 1300$, $\mathrm{Fr} = 18{,}4$, такое отличие надежно регистрировалось при временах $\sim 5\cdot10^3$ с.

Таким образом, использование сканирования узкого лазерного пучка в сочетании с теневыми методами позволяет эффективно изучать динамику плотностной структуры стратифицированных течений. При этом не предъявляется высоких требований к оптическому качеству бассейна и метод является достаточно универсальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тернер Дж.** Эффекты плавучести в жидкости.— М.: Мир, 1977.
2. **Гуменник Е. В., Ринкевичюс Б. С.** Лазерный сканирующий рефрактометр для теплофизических исследований // ТВТ.— 1985.— Т. 23, № 4.
3. **Гуменник Е. В., Евтихиева О. А., Ринкевичюс Б. С., Чашечкин Ю. Д.** Совместное использование качественных и количественных рефрактометрических методов // ИФЖ.— 1986.— Т. 50, № 4.
4. **Гуменник Е. В., Ринкевичюс Б. С.** Использование рефракции сканируемого лазерного пучка для исследования структуры прозрачных неоднородностей // ТВТ.— 1987.— Т. 25, № 6.
5. **Oster G.** Density gradients // Scient. Amer.— 1965.— V. 212, N 12.
6. **Айвазова Л. С., Горбач Т. Я., Кролевец К. М., Савелов В. Н.** Четырехэлементные позиционно-чувствительные фотодиоды // Полупроводниковая техника и микроэлектроника.— Киев: Наук. думка, 1966.
7. **Mowbray D. E.** The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of the flow patterns in density stratified // J. Fluid Mech.— 1967.— V. 27, N 3.
8. **Schooley A. H.** Wake collapse in a stratified fluid // Science.— 1967.— V. 157, N 3787.
9. **Merritt G. E.** Wake growth and collapse in stratified flow // AIAA J.— 1974.— V. 12, N 7.

г. Москва *Поступила 15/XI 1988 г.*

УДК 533.95:537.84

П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, К. А. Тен

УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Ряд авторов [1—3] справедливо отмечают «паразитную» роль индуктивности цепи коммутатора, выводящего энергию из накопителя в нагрузку. Действительно, напряжение на коммутаторе в простейшей электротехнической модели (рис. 1) дается выражением

$$U_в = U_н + L_н\dot I_н - MI - L_в\dot I_в = V_н - M\dot I - L_в\dot I_в.$$

Здесь индексами в и н отмечены величины, относящиеся к цепи выключателя и нагрузки; $L_в$, $L_н$ и M — индуктивности и взаимоиндукция контуров накопителя и нагрузки; точкой обозначена, как обычно, производная по времени; $U_в$, $U_н$ — в общем случае нелинейные характеристики коммутатора и нагрузки, не связанные с их индуктивностями; $V_н$ — напряжение на нагрузке.

При успешной работе коммутатора $\dot I_в < 0$, $\dot I < 0$, откуда вытекает, что $U_в \geqslant V_н$, причем равенство достигается в момент окончания переключения тока. Далее, так как ток в коммутаторе изменяется от максимального до нуля, а в нагрузке от нуля до максимального, из неравенства напряжений следует, что на начальном этапе переключения мощность, рассеиваемая коммутатором, должна превосходить мощность, выделяющуюся в нагрузке, а в некоторых случаях и максимальное ее значение. Таким образом, индуктивность в цепи коммутатора приводит к ужесточению условий его работы. При $M < 0$, что всегда можно выполнить конструктивно в случае индуктивных накопителей энергии, условия работы коммутатора несколько облегчаются. В МК-генераторах это условие не всегда выполнимо.

Так обстоит дело в том случае, когда индуктивность цепи коммутатора постоянна или меняется слабо. При значительном ее изменении картина протекания процесса может быть совсем иной. Переключение тока возможно при этом в силу того, что на изменяющейся индуктивности возникает ЭДС ($\varepsilon = -d(LI)/dt$), позволяющая управлять током. В ВМГ уменьшающаяся индуктивность используется для получения больших токов, магнитных полей и энергий [4—6].

Цель настоящей работы — показать возможность управления током в различных электрических цепях как уменьшающейся, так и возрастающей индуктивностью. Такой способ управления током имеет ряд преимуществ по сравнению, например, с размыкателями. К ним следует отнести отсутствие диссипации (дуга) энергии в среде, нарушающей ее начальные электрофизические свойства, возможность управления током по заранее заданному закону и др.

Остановимся на нескольких простых электротехнических моделях схем, используемых в импульсной энергетике, для получения больших мощностей. При этом не будем касаться причин, вызывающих изменение коммутирующей индуктивности, так как они могут быть разнообразны и в каждом конкретном случае свои. Кроме того, будем пренебрегать джоулевыми потерями, считая проводники идеальными.

1. Управление током коммутирующей индуктивностью при выводе энергии из накопителя в индуктивную нагрузку рассмотрим по схеме (рис. 1), использованной Кнопфелем [7] при демонстрации работы индуктивного накопителя ($U_в$ и $V_н = 0$). В этой схеме $L_в$ — изменяющаяся индуктивность, L_0 и $L_н$ — постоянные индуктивности накопителя и нагрузки, I, $I_в$, $I_н$ — токи в накопителе, в коммутирующей индуктивности и в нагрузке. Уравнения, описывающие изменение токов в цепи, имеют вид

$$(1.1)\qquad L_0\dot I + (\dot{L_в I_в}) + M\dot I_н = 0,$$

$$L_н\dot I_н - (\dot{L_в I_в}) + M\dot I = 0,\ I = I_в + I_н$$

с начальными условиями $L_в = L_{0в}$, $I = I_в = I_0$, $I_н = 0$. Решением (1.1) будут токи

$$I_в = I_0\frac{L_{0в}(L_0 + L_н + 2M) + L_0L_н - M^2}{L_в(L_0 + L_н + 2M) + L_0L_н - M^2},\quad I_н = I_0\frac{(L_в - L_{0в})(L_0 + M)}{(L_0 + L_н + 2M)L_в + L_0L_н - M^2}.$$

При возрастающей коммутирующей индуктивности ($\dot L_в > 0$) ток в ней становится малым при $L_в \gg L_0$, $L_н$ и в пределе при $L_в \to \infty$ $I_в \to 0$, а ток в нагрузке стремится к своему предельному значению $I_н = I =$

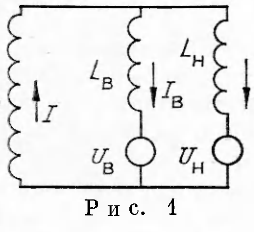

Рис. 1

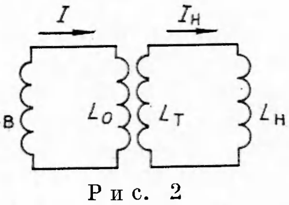

Рис. 2

$= I_0(L_0 + M)/(L_0 + L_н + 2M)$. Энергия, переданная в нагрузку,

$$W_н = W_0 \frac{(L_0+M)^2}{(L_0+L_{0в})} \frac{L_н}{(L_0+L_н+2M)^2}$$

имеет максимум при $L_н = L_0 + M$, равный

$$W_{н\,max} = W_0 \frac{(L_0+M)^3}{(L_0+L_{0в})\,(2L_0+3M)^2}$$

(W_0 — накопленная энергия). Это выражение согласуется с приведенным в [7] ($W_н = (1/4)W_0$) при $L_0 \gg L_{0в}$ и M, что всегда можно выполнить конструктивно в индуктивных накопителях энергии.

Рассмотрим мощность, развивающуюся на нагрузке и равную $N_н = L_н I_н \dot{I}_н$. В случае линейно изменяющейся коммутирующей индуктивности ($M \ll L_0$, $L_н$) она максимальна при

$$L_в = (3/2)L_{0в} + L_0 L_н/[2(L_0 + L_н)]$$

и равна при условии максимальной передачи энергии ($L_н = L_0$)

$$N_{н\,max} = \frac{2}{27}\dot{L}_в I_0^2 L_0/(L_0 + 2L_{0в}).$$

Из этого выражения видно, что даже при $L_0 \gg L_{0в}$ максимальная мощность, выделяющаяся в нагрузке, на порядок оказывается меньше максимальной мощности в коммутирующей индуктивности $N_{в\,max} \approx \approx \dot{L}_в I_0^2$.

Характерно, что скорость изменения индуктивности для получения максимальной мощности в индуктивной нагрузке обратно пропорциональна квадрату накопленного тока:

$$\dot{L}_в \approx 13{,}5 N_{max}/I_0^2.$$

Максимальное напряжение на нагрузке при $\dot{L}_в > 0$ имеет место в начальный момент времени и равно

$$V_{н\,max} = \dot{L}_в I_0 L_н L_0/[L_{0в}\,(L_0 + L_н) + L_0 L_н],$$

оно оказывается меньше максимального напряжения на коммутирующей индуктивности ($\sim \dot{L}_в I_0$), и только при малой $L_{0в}$ максимальные напряжения совпадают и определяются накопленным током и скоростью изменения $L_в$.

Уменьшающаяся коммутирующая индуктивность приводит к увеличению тока в цепи управления, в этом случае ($L_в \to 0$)

$$I_в = I_0 \frac{L_{0в}(L_0+L_н+2M) + L_н L_0 - M^2}{L_0 L_н - M^2}, \quad I_н = -I_0 \frac{L_{0в}(L_0+M)}{L_0 L_н - M^2}.$$

Энергия в нагрузке

$$W_н = \frac{1}{2} L_н I_н^2 = W_0 \frac{L_н L_{0в}^2 (L_0+M)^2}{(L_0+L_{0в})\left(L_0 L_н - M^2\right)^2}$$

может значительно превосходить начальную энергию W_0 при сильной связи контуров, когда $L_0 L_н \sim M^2$, и при слабой связи, если $L_{0в} \gg \gg L_н$ и L_0. В обоих случаях энергия поставляется за счет работы по уменьшению индуктивности $L_в$. В первом случае ($M^2 \sim L_0 L_н$) работа производится в большом поле, во втором — на большом пути.

2. Рассмотрим трансформаторную схему передачи энергии в индуктивную нагрузку (рис. 2). Уравнения, описывающие изменение токов, запишем в виде

$$(L_в\dot{I}) + L_0\dot{I} + M\dot{I}_н = 0,\qquad L_т\dot{I}_н + L_н\dot{I}_н + M\dot{I} = 0 \tag{2.1}$$

с начальными условиями $I = I_0$, $I_н = 0$, $L_в = L_{0в}$. Обозначения входящих в уравнения величин ясны из рис. 2. Здесь связь катушек в трансформаторе сильная, а взаимодействием контуров пренебрегается, тогда решением системы (2.1) будут токи

$$I = I_0\frac{L_{0в}(L_т+L_н)+L_0L_н}{L_в(L_т+L_н)+L_0L_н},\quad I_н = I_0\frac{M(L_в-L_{0в})}{L_в(L_т+L_н)+L_0L_н}.$$

Ток I и энергия в накопителе стремятся к нулю при $L_в\to\infty$, а энергия в нагрузке — к значению $W_н = W_0L_нM^2/[(L_0+L_{0в})(L_т+L_н)^2]$, имеющему максимум при $L_н = L_т$ и равному $W_{н\max} = (1/4)W_0M^2/[(L_0+L_{0в})L_т]$. При $L_0 \gg L_{0в}$ и $M^2 \approx L_0L_т$ энергия, переданная во вторичный контур, $(1/2)\ W_0$.

Мощность, развиваемая в индуктивности нагрузки при линейно меняющейся $L_в$, имеет максимум при $L_в = (3/2)\ L_{0в} + L_0L_н/[2\ (L_т + L_н)]$ и при условии максимальной передачи энергии и $L_0 \gg L_{0в}$ равна $N_{н\max} = \frac{1}{16}\dot{L}_вI_0^2$. Как и в первом примере, она более чем на порядок меньше максимальной мощности в коммутаторе.

Напряжение на нагрузке

$$V_н = I_0\dot{L}_вML_н\frac{L_0L_н+L_{0в}(L_т+L_н)}{(L_в(L_т+L_н)+L_0L_н)^2}$$

оказывается максимальным в начальный момент времени, и при наложенных выше ограничениях на параметры цепи его максимальное значение $V_{н\max} = \dot{L}_вI_0\sqrt{L_т/L_0}$ может существенно превосходить при $L_т \gg L_0$ максимальное значение напряжения $\dot{L}_вI_0$ на коммутирующей индуктивности. Максимальное же значение тока достигается при $L_н = 0$ и равно $I_0\sqrt{L_0/L_т}$. При убывающей коммутирующей индуктивности ($\dot{L}_в < 0$) максимальное значение мощности и напряжения на нагрузке достигаются при $L_в \to 0$, их предельные значения следующие:

$$N_{н\max} = I_0^2|\dot{L}_в|\frac{L_{0в}L_т}{L_0L_н}\left[1+\frac{L_{0в}(L_т+L_н)}{L_0L_н}\right],$$

$$V_{н\max} = I_0|\dot{L}_в|\sqrt{\frac{L_т}{L_0}}\left[1+\frac{L_{0в}(L_т+L_н)}{L_0L_н}\right].$$

Энергия, переданная в нагрузку, при $L_{0в} \gg L_0$ равная $W_н = W_0L_{0в}L_т/(L_0L_н)$, может значительно превосходить начальную, накопленную в первом контуре. Формально $W_н\to\infty$ при $L_н\to 0$. Сильно возрастающее значение $W_н$ по сравнению с W_0 связано с большей работой по уменьшению $L_{0в}$ в сильном поле.

В рассмотренных примерах при увеличивающейся индуктивности коммутатора, если считать системы замкнутыми, приблизительно половина запасенной вначале энергии переходит в кинетическую энергию движущихся проводников. Поэтому мы считаем возможным вывод энергии из накопителя в нагрузку за счет части накопленной энергии, предоставив коммутирующей индуктивности развиваться в нужном направлении под действием электромагнитных сил.

3. Динамическая трансформаторная передача энергии может осуществляться по схеме (рис. 3), в которой коммутирующая ин-

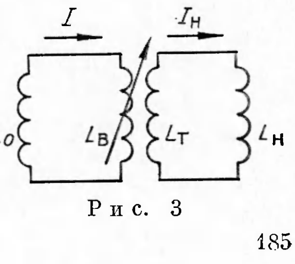

Рис. 3

дуктивность является первичной обмоткой трансформатора. Уравнения, описывающие изменение токов в системе, представим в виде $L_0\dot{I} + (L_{\text{в}}I)^{\boldsymbol{\cdot}} + (MI_{\text{н}})^{\boldsymbol{\cdot}} = 0$. $(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})\,\dot{I}_{\text{н}} + (MI)^{\boldsymbol{\cdot}} = 0$ с начальными условиями $I_{\text{н}} = 0$, $I = I_0$, $L_{\text{в}} = L_{0\text{в}}$ и $M = M_0$; решением их будут токи

$$I_{\text{н}} = I_0 \frac{M_0\,(L_0 + L_{\text{в}}) - M\,(L_0 + L_{0\text{в}})}{(L_0 + L_{\text{в}})\,(L_{\text{т}} + L_{\text{н}}) - M^2}, \quad I = I_0 \frac{(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})\,(L_0 + L_{0\text{в}}) - MM_0}{(L_0 + L_{\text{в}})\,(L_{\text{т}} + L_{\text{н}}) - M^2}.$$

Увеличение индуктивности $L_{\text{в}}$ может носить различный характер, при этом имеют место случаи, когда k в процессе изменения $L_{\text{в}}$ остается постоянным ($k \approx 1$), уменьшается ($k \to 0$) или возрастает от нуля до $k \approx 1$.

При $k = 1$ токи $I_{\text{н}}$ и I обращаются в нуль при $L_{\text{в}} = L_0^2/L_{0\text{в}}$ и $L_{\text{в}} = [(L_0 + L_{0\text{в}})^2/L_{0\text{в}}]\,(1 + L_{\text{н}}/L_{\text{т}})$ соответственно, т. е. неодновременно, для $I_{\text{н}}$ это наблюдается при $L_{0\text{в}} < L_0$. Одновременное обращение их в нуль приводит к прекращению процесса, что возможно, когда $L_{\text{н}} = 0$ и $L_{0\text{в}} \ll L_0$. Энергия электромагнитного поля, сосредоточенная вначале практически полностью в L_0, становится равной нулю. Если система замкнута, то накопленная вначале энергия в первом контуре переходит полностью в кинетическую энергию движущихся масс увеличивающейся индуктивности. Характерно, что переход полностью завершается при достижении индуктивностью $L_{\text{в}}$ конечного значения, равного $L_0^2/L_{0\text{в}}$. Если бы контур был свободен ($L_{\text{т}} = 0$), то переход электромагнитной энергии взаимодействия токов в кинетическую осуществлялся бы до $L_{\text{в}} \to \infty$. Это различие обусловлено значительно большими электромагнитными силами в присутствии трансформатора, препятствующего убыванию тока с ростом $L_{\text{в}}$. Описанная ситуация может быть использована при электромагнитном метании тел.

При указанных индуктивностях $L_{\text{в}}$ токи меняют знак, и при $L_{\text{в}} \to \infty$ ток в нагрузке стремится к предельному $I_{\text{нп}} = I_0M_0/L_{\text{н}}$, а энергия во вторичном контуре — к $W = W_0M_0^2\,(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})/[(L_0 + L_{0\text{в}})\,L_{\text{н}}^2]$. Ток I после изменения знака вначале растет по абсолютной величине, затем убывает, и в пределе $L_{\text{в}} \to \infty$ $I = 0$.

В случае $L_{0\text{в}} > L_0$ с ростом $L_{\text{в}}$ характер изменения I остается прежним, ток же $I_{\text{н}}$ теперь в нуль не обращается, а стремится к своему предельному значению ($I_{\text{н}} = I_0M_0/L_{\text{н}}$).

Формально при $L_{\text{н}} \to 0$ $I_{\text{н}}$ и W неограниченно возрастают. Это означает, что увеличение коммутирующей индуктивности происходит при совершении работы по сжатию магнитного поля тока в трансформаторе. Характерно, что сжатие поля осуществляется не током, создающим поле, а током в другом контуре.

В тех случаях, когда коэффициент связи является функцией $L_{\text{в}}$, анализ процессов затруднителен. Рассмотрим лишь предельные случаи. Пусть $M \to 0$ при $L_{\text{в}} \to \infty$. Ток в первичном контуре стремится при этом к нулю, а во вторичном — к значению $I_{\text{н}} = I_0M_0/(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})$, энергия — к $W_0M_0^2/[(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})(L_0 + L_{0\text{в}})]$. Это малая величина при $L_0 \gg L_{0\text{в}}$ и сравнима с W_0 при $L_{0\text{в}} \gg L_0$ и $L_{\text{н}} \approx 0$.

При $M_0 = 0$ и $k \to 1$ при возрастании $L_{\text{в}}$ ток $I_{\text{н}}$ растет по абсолютной величине, достигает максимума при $L_{\text{в}} \approx L_0\,(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})/L_{\text{н}}$ и уменьшается. Максимальное значение тока формально при $L_{\text{н}} \to 0$ неограниченно растет.

Уменьшение коммутирующей индуктивности $L_{\text{в}}$ до нуля приводит к предельным значениям токов, равным $I_{\text{н}} = I_0M_0/(L_{\text{т}} + L_{\text{н}})$ и $I = I_0(L_0 + L_{0\text{в}})/L_0$. Энергия в системе при $L_0 \gg L_{0\text{в}}$ оказывается порядка W_0, а при $L_{0\text{в}} \gg L_0$ может существенно превосходить начальную ($\sim L_{0\text{в}}/L_0$).

Рассмотренные выше примеры некоторых схем из идеальных проводников позволяют надеяться на возможное удачное использование изменяющейся индуктивности для управления токами в импульсных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Герасимов Л. С., Искольдский А. М., Нестерихин Ю. В., Пикус В. К.** Передача энергии из индуктивного накопителя с помощью электровзрывного размыкателя тока // ПМТФ.— 1975.— № 1.
2. **Демидов В. А., Жаринов Е. И., Казаков С. А., Чернышев В. К.** Вывод энергии из индуктивных накопителей и взрывомагнитных генераторов в индуктивную нагрузку с помощью разрыва контура // ПМТФ.— 1978.— № 4.
3. **Демидов В. А., Жаринов Е. И., Казаков С. А., Чернышев В. К.** Вывод энергии из взрывомагнитных генераторов в индуктивную нагрузку с помощью разрыва контура // ПМТФ.— 1979.— № 1.
4. **Терлецкий Я. П.** Получение сверхсильных магнитных полей путем быстрого сжатия проводящих оболочек // ЖЭТФ.— 1957.— Т. 32, № 2.
5. **Биченков Е. И.** Взрывные генераторы // ДАН СССР.— 1967.— Т. 174, № 4.
6. **Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. И. и др.** Магнитная кумуляция // ДАН СССР.— 1965.— № 1.
7. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля.— М.: Мир, 1972.

г. Новосибирск *Поступила 29/XI 1988 г.*