

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, Г. В. САЛОВ

(Киев)

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЯМИ ИЗМЕНЕНИЕМ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ПОЛЯ

Для улучшения организации управления объектами и технологическими процессами большое внимание уделяется автоматизации обработки контрольно-измерительной информации с привлечением для этой цели цифровых вычислительных машин. Простоту ввода контрольно-измерительной информации в цифровые вычислительные машины обеспечивает частотная форма ее представления на выходе датчиков контролируемых на объекте параметров. При реализации частотных измерительных систем широко используются управляемые реактивности. Однако существующие способы управления реактивностями не свободны от ряда недостатков. В частности, при механическом управлении путем изменения взаимного расположения деталей или элементов реактивностей (катушек в вариометрах, электродов конденсаторов, воздушных зазоров магнитной цепи или между электродами конденсатора и т. п.) в ряде случаев нет возможности обеспечить в одном устройстве необходимый диапазон изменения реактивностей, и такое управление не всегда удобно по конструктивным соображениям и невысокой механической надежности (ввиду использования подвижных деталей и необходимости привода при автоматизации управления). При известном электрическом управлении путем изменения управляющего постоянного напряжения или тока (магнитомодуляционные устройства, варикапы, реактивные лампы и т. д.) обеспечиваются невысокие коэффициенты управления, требуется управляющий источник постоянного напряжения (тока) и, кроме того, вносятся большие искажения в форму тока или напряжения. Поэтому для расширения технических возможностей частотных измерительных систем, а также в ряде случаев для обеспечения их работоспособности авторами статьи разработан амплитудно-фазовый способ управления реактивностями изменением результирующего поля [1], сущность которого излагается ниже.

Предложенный нами способ управления является схемным. Он использует n -секционные ($n \geq 2$) реактивности с тесной электромагнитной связью секций и регулируемые или постоянные по величине сопротивления активного, активно-реактивного или реактивного характера (рис. 1, 2). Способ реализуется следующим образом: часть секций n -секционной реактивности соединяют с источником переменного напряжения питания непосредственно, а другую часть — через последователь-

но соединенное с каждой секцией либо активное сопротивление, либо активно-реактивное сопротивление, либо реактивное сопротивление, противоположное по характеру n -секционной реактивности,— соединяют с первыми секциями параллельно и встречно. При этом суть способа заключается в том, чтобы, используя противоклучение параллельно соединенных секций реактивностей, имеющих тесную электромагнитную

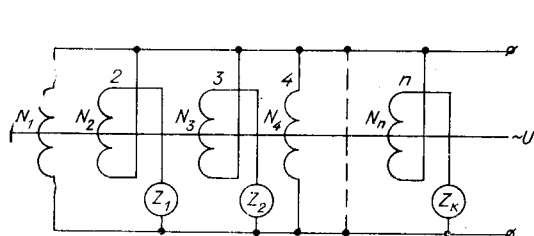


Рис. 1.

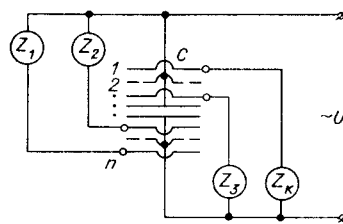


Рис. 2.

связь, тем или иным образом создавать изменения соотношений токов или напряжений параллельных ветвей или секций и тем самым изменять результирующее электромагнитное поле (в сердечнике дросселя, диэлектрике конденсатора) и управлять значениями эффективных реактивностей.

Для изменения соотношений токов или напряжений параллельных ветвей или секций n -секционных реактивностей используются вариации сопротивлений активного, активно-реактивного или реактивного (противоположного по знаку управляемой реактивности) характера, включенных в k из числа n параллельных ветвей. Это позволяет осуществить преобразование варьируемых сопротивлений в реактивности, например активного, активно-емкостного или емкостного сопротивления в индуктивную (рис. 3, а, б), активного, активно-индуктивного или индуктивного сопротивления в емкость (рис. 4, а, б), или получить сложные функциональные зависимости указанных параметров (см. рис. 1, 2).

При неизменных значениях добавочных сопротивлений и вариации частоты питающего напряжения соотношение токов в параллельных ветвях или соотношение напряжений, приложенных к секциям, также изменяются, что обусловлено различным характером изменения проводимостей параллельных ветвей. При этом реализуются самоварьирующиеся по различным законам с изменением частоты питающего напряжения реактивности.

Амплитудно-фазовый способ управления реактивностями изменением результирующего поля позволяет получить: управляемую самовариацию реактивностей с изменением частоты питающего напряжения; абсолютные значения эффективных реактивностей большими по величине, чем это допускается их параметрами; непосредственное преобразование активного, активно-реактивного или реактивного сопротивления одного знака в реактивность другого знака.

Индуктивные преобразователи. Рассмотрим работу преобразователей активного сопротивления в индуктивность и самоварьирующихся с изменением ча-

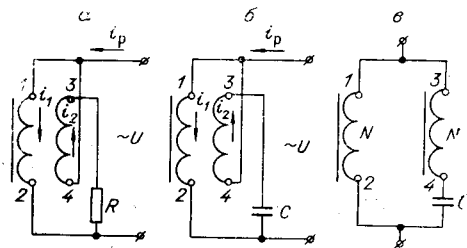


Рис. 3.

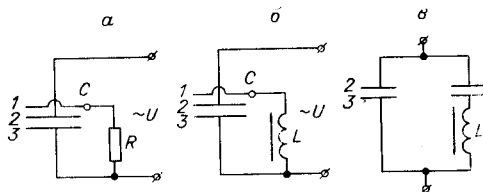


Рис. 4.

материалу обмоточного провода), имеющими тесную магнитную связь, согласную намотку, параллельное соединение и встречное включение (см. рис. 3, а).

Если $R=0$, то проводимости секций равны, по секциям протекают равные по величине токи, но в противоположных направлениях, и индуктивность устройства, как в катушке с бифилярной намоткой, оказывается близкой к нулю. Если $R \neq 0$, то токи в секциях не равны. Это неравенство тем больше, чем больше величина активного сопротивления. Вариации R обуславливают изменения результирующего магнитного потока в сердечнике дросселя (Φ_p) и, в конечном итоге, приводят к изменению коэффициента индукции устройства (N_c), определяемого для рассматриваемого случая отношением разности токов в секциях к их сумме:

$$N_c = - \frac{e_{Np}}{\frac{di_p}{dt}} = \omega \frac{\frac{d\Phi_p}{dt}}{\frac{di_p}{dt}} = \omega \frac{d(\Phi_{11} - \Phi_{22})}{d(i_1 + i_2)} = F_1 \left(\frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \right), \quad (1)$$

где e_{Np} — результирующая противо-э.д.с. индукции; i_p — результирующий ток устройства; ω — число витков секции; $i_1, i_2, \Phi_{11}, \Phi_{22}$ — токи секций и наводимые ими магнитные потоки. Самовариация коэффициента индукции с изменением частоты питающего напряжения при условии $R = \text{const} \neq 0$ объясняется разным характером изменения проводимостей параллельных ветвей, что эквивалентно управлению коэффициентом индукции устройства частотой питающего напряжения. Пренебрегая собственными активными сопротивлениями секции обмотки дросселя, а также полагая полное сопротивление параллельной ветви с управляющим сопротивлением активным и равным R , что справедливо при условии $R \gg \omega N$, где N — коэффициент индукции секции, можем записать

$$N_c = F_2 \left(\frac{R - \omega N}{R + \omega N} \right). \quad (2)$$

Характер вариации коэффициента индукции устройства с изменением R или частоты питающего напряжения описывается уравнениями:

$$\frac{\partial F_2}{\partial R} = \frac{2\omega N}{(R + \omega N)^2} > 0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial R} = 0 \text{ при } R \rightarrow \infty; \quad \frac{\partial^2 F_2}{\partial R^2} = - \frac{4\omega N}{(R + \omega N)^3} < 0,$$

т. е. с увеличением R от 0 до ∞ коэффициент индукции устройства увеличивается от величины, близкой к 0, до N . При этом кривая $N_c(R)$ имеет выпуклый характер;

$$\frac{\partial F_2}{\partial \omega} = - \frac{2NR}{(R + \omega N)^2} < 0; \quad \frac{\partial^2 F_2}{\partial \omega^2} = \frac{4N^2 R}{(R + \omega N)^3} > 0,$$

т. е. при $R = \text{const} \neq 0$ с изменением частоты питающего напряжения коэффициент индукции устройства уменьшается. Кривая $N_c(\omega)$ имеет вогнутый характер.

Работу преобразователей емкостного сопротивления в индуктивность и самоварьирующихся с изменением частоты питающего напряжения индуктивностей, построенных на элементах L и C [2], рассмотрим на примере устройства, схема которого приведена на рис. 3, б. Если пренебречь тесной магнитной связью секций обмотки дросселя и их встречным включением, то эквивалентная электрическая схема устройства имеет вид резонансного контура, представленного на рис. 3, в. При этом одна из параллельных ветвей представляет собой последовательный резонансный контур, в котором на частоте $\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{NC}}$

возможен резонанс напряжений. Резонансная частота параллельного контура $\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{2NC}}$ и $\omega_{02} < \omega_{01}$. При значении частоты питающего

напряжения $\omega < \omega_{02}$ реактивные составляющие проводимостей параллельных ветвей имеют разный характер: $b_1 = b_N$, $b_2 = b_C$ и, кроме того, $b_N > b_C$. Для преобразователя типа $C \rightarrow L$ за счет изменения управляющей емкости C изменяется резонансная частота параллельного контура, приближаясь или отходя от постоянной частоты питающего напряжения, находящейся в диапазоне $0 < \omega < \omega_{02}$. Для самоварьирующейся с изменением частоты питающего напряжения индуктивности на базе элементов L и C частота питающего напряжения приближается к резонансной частоте параллельного контура (ω_{02}) или отходит от нее, изменяясь в диапазоне $0 < \omega < \omega_{02}$.

За счет схемного противовключения секций обмотки дросселя и разного характера проводимостей параллельных ветвей результирующий магнитный поток в сердечнике дросселя определяется геометрической суммой потоков, наводимых токами секций ($\bar{\Phi}_p = \bar{\Phi}_{11} + \bar{\Phi}_{22}$), а следовательно, суммой токов ($i_1 + i_2$), в то время как результирующий ток из-за разного характера проводимостей параллельных ветвей определяется разностью токов секций $i_p = i_1 - i_2$. Поэтому в рассматриваемом случае (см. рис. 3, б) коэффициент индукции устройства определяется отношением суммы токов к их разности

$$N_c = F_3 \left(\frac{i_1 + i_2}{i_1 - i_2} \right) = F_4 \left(\frac{1}{1 - 2\omega^2 NC} \right). \quad (3)$$

Характер вариации коэффициента индукции устройства с изменением управляющей емкости C или частоты питающего напряжения в диапазоне $0 < \omega < \omega_{02}$ будет описываться уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_4}{\partial C} &= \frac{2\omega^2 N}{(1 - 2\omega^2 NC)^2} > 0; & \frac{\partial^2 F_4}{\partial C^2} &= \frac{8\omega^4 N^2}{(1 - 2\omega^2 NC)^3} > 0; \\ \frac{\partial F_4}{\partial \omega} &= \frac{4\omega NC}{(1 - 2\omega^2 NC)^2} > 0; & \frac{\partial^2 F_4}{\partial \omega^2} &= \frac{4NC(1 + 6\omega^2 NC)}{(1 - 2\omega^2 NC)^3} > 0. \end{aligned}$$

Следовательно, при постоянном значении частоты питающего напряжения, находящейся в диапазоне $0 < \omega < \omega_{02}$, и увеличении управляющей емкости C коэффициент индукции устройства увеличивается; при этом функция $N_c(C)$ имеет вогнутый характер. При увеличении управляющей емкости до величины, близкой к критическому значению,

$$C_{кр} = \frac{1}{2\omega^2 N_1}, \quad (4)$$

ω_{02} приближается к $\omega = \text{const}$. Токи в параллельных ветвях значительно возрастают (резонанс токов), обуславливая увеличение результирующей противо-э.д.с. индукции. В то же время результирующий ток устройства уменьшается, стремясь к величине, определяемой активными составляющими проводимостей параллельных ветвей. Поэтому при $C \rightarrow C_{кр}$ коэффициент индукции устройства возрастает до величины, во много раз превышающей индуктивность дросселя при согласном включении секций обмотки.

При увеличении частоты питающего напряжения от 0 до ω_{02} коэффициент индукции устройства увеличивается; при этом функция $N_c(\omega)$ имеет вогнутый характер. При $\omega \rightarrow \omega_{02}$ наступает описанный выше резонанс токов, что приводит к значительному увеличению коэффициента индукции устройства.

При $\omega > \omega_{02}$ или $C > C_{кр}$ проводимость $b_c > b_N$, поэтому $i_2 = b_c U$ становится больше $i_1 = b_N U$ и коэффициент индукции устройства практически обращается в нуль.

Емкостные преобразователи. В качестве базового элемента емкостного преобразователя используется n -электродный конденсатор, четные пластины которого, соединенные между собой, образуют одну группу, а нечетные — другую. Это аналогично конденсатору с параллельным соединением пластин, но с одним отличием, которое состоит в том, что в группах соединение пластин осуществляется через сопротивление активного, индуктивного или комплексного характера, обозначенных на рис. 2 через Z . Кроме того, питание подводится к охватываемым электродам непосредственно, а охватывающие электроды оказываются подключенными к источнику переменного напряжения через указанные выше сопротивления.

Принципиальные электрические схемы емкостного преобразователя и самоварьбирующейся с изменением частоты питающего напряжения емкости для количества электродов $n=3$, а также эквивалентная схема замещения без учета тесной электрической связи секций представлены соответственно на рис. 4, а, б и в. При условии $Z=0$ устройство представляет собой конденсатор с параллельно соединенными обкладками. При $Z \neq 0$ и, например, при активном его характере к обкладкам 1—2 (см. рис. 4, а, б) трехэлектродного конденсатора будет приложено напряжение, меньшее на величину падения напряжения на Z . Это приводит к уменьшению свободного заряда на пластинах 1—2. Так как емкость устройства C_c в общем случае определяется отношением суммарного свободного заряда $\sum Q$ на одноименно заряженных пластинах (положительных) к напряжению U , приложенному к устройству,

$$C_c = \frac{\sum Q}{U} \quad (5)$$

и так как несравенство $Z \neq 0$ приводит к изменению указанного суммарного заряда, то, изменяя Z , можно управлять емкостью устройства.

Для активного характера добавочного сопротивления (см. рис. 4, а) формула (5) имеет вид

$$C_c = C_0 \left(1 + \frac{1}{R\omega C_0} \right), \quad (6)$$

где C_0 — емкость пары электродов 2—3. Частные производные C_c по R и ω соответственно равны:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_c}{\partial R} &= -\frac{1}{R^2\omega} < 0; & \frac{\partial^2 C_c}{\partial R^2} &= \frac{2}{R^3\omega} > 0; \\ \frac{\partial C_c}{\partial \omega} &= -\frac{1}{R\omega^2} < 0; & \frac{\partial^2 C_c}{\partial \omega^2} &= \frac{2}{R\omega^3} > 0, \end{aligned}$$

что свидетельствует о вариациях C_c с изменением R или ω и характеризует эти вариации.

При индуктивном характере добавочного сопротивления (см. рис. 4, б) и частоте напряжения питания, находящейся в диапазоне $0 < \omega < \omega_{01}$, где $\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}$ — резонансная частота последовательного колебательного контура (см. рис. 4, в), формулу (5) запишем в виде

$$C_c = C_0 \left(1 + \frac{1}{1 - \omega^2 LC_0} \right), \quad (7)$$

а частные производные по L и ω , показывающие характер вариации C_c с изменением L или ω , будут следующие:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_c}{\partial L} &= \frac{\omega^2 C_0^2}{(1 - \omega^2 LC_0)^2} > 0; & \frac{\partial^2 C_c}{\partial L^2} &= \frac{2\omega^4 C_0^3}{(1 - \omega^2 LC_0)^3} > 0; \\ \frac{\partial C_c}{\partial \omega} &= \frac{2\omega LC_0^2}{(1 - \omega^2 LC_0)^2} > 0; & \frac{\partial^2 C_c}{\partial \omega^2} &= \frac{2LC_0(1 + 3\omega^2 LC_0)}{(1 - \omega^2 LC_0)^3} > 0. \end{aligned}$$

При увеличении частоты питающего напряжения от 0 на подходе к ω_{01} возникают явления, обусловленные резонансом напряжений. При этом напряжение, приложенное к секции 1—2 (см. рис. 4, б), значительно возрастает. Это приводит к увеличению свободного (положительно-го) заряда на обкладках 1—2, суммарного свободного заряда на одноименно заряженных пластинах, что является причиной значительного увеличения эффективной емкости устройства при $\omega \rightarrow \omega_{01}$. Аналогичный эффект возникает при постоянной частоте питающего напряжения $\omega = \text{const}$ и вариациях индуктивности на подходе к ее критическому значению $L_{\text{кр}} = \frac{1}{\omega^2 C_0}$.

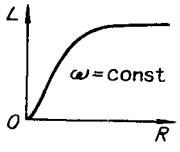
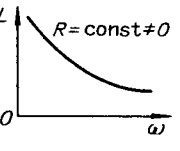
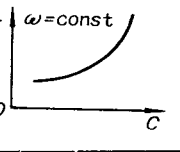
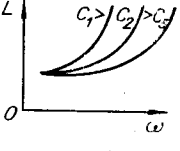
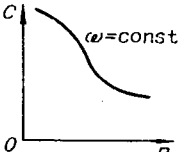
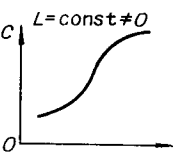
Экспериментальное исследование устройств. Теоретические исследования характера вариации реактивностей рассмотренных устройств с изменением управляющих сопротивлений или частоты питающего напряжения совпадают по результатам с экспериментально полученными рабочими характеристиками устройств. Экспериментальное исследование устройств, реализующих предложенный способ, произведено в диапазонах частоты питающего напряжения: индуктивных — 0,1—10 кГц, емкостных — 1—50 кГц. При этом эффективность устройств оценивалась с помощью следующих параметров: коэффициента управления $K = \frac{A_{\text{max}}}{A_{\text{min}}}$, где A_{max} — максимальное, а A_{min} — минимальное значение эф-

фективных реактивностей; средней чувствительности $S_{\text{ср}} = \frac{\Delta A}{\Delta B}$, где

$\Delta A = A_{\text{max}} - A_{\text{min}}$ — диапазон изменения реактивности, а ΔB — диапазон изменения управляющего параметра; максимальной чувствительности $S_{\text{max}} = A'(B)$ на участке максимальной крутизны характеристики $A(B)$.

Результаты экспериментальных исследований рассмотренных устройств представлены табл. 1. В качестве базового элемента экспериментальных образцов емкостных преобразователей использовался трехэлектродный конденсатор, изготовленный из фольгированного

Таблица 1

Назначение преобразователя	Принципиальная электрическая схема	Значения основных параметров, полученных экспериментально			Вид рабочей характеристики
		K	S_{cp}	S_{max}	
$R \rightarrow L$	Рис. 3, а	2200	0,012 мГ/Ом	21,2 мГ/Ом	
$\omega \rightarrow L$	Рис. 3, а	10,5	0,044 мГ/Гц	0,245 мГ/Гц	
$C \rightarrow L$	Рис. 3, б	38	12 мГ/пФ	2320 мГ/пФ	
$\omega \rightarrow L$	Рис. 3, б	112	0,248 мГ/Гц	1,55 мГ/Гц	
$R \rightarrow C$	Рис. 4, а	1,42	0,19 пФ/кОм	0,41 пФ/кОм	
$\omega \rightarrow C$	Рис. 4, б	2,2	0,041 пФ/Гц	0,38 пФ/Гц	

гетинакса с площадью поверхности пластины 50 см² и толщиной 1,5 мм. При исследовании самоварьирующей с изменением частоты питающего напряжения емкости (см. рис. 4, б) L выбрано равным 76 мГ. Основные технические данные экспериментальных образцов индуктивных преобразователей представлены в табл. 2.

Исследования показали, что пассивные индуктивные и емкостные преобразователи, а также самоварьирующиеся с изменением частоты питающего напряжения индуктивности и емкости обладают значительными коэффициентами управления, в ряде случаев достаточными средней и максимальной чувствительностью; имеется возможность управ-

Таблица 2

Назначение преобразователя	Принципиальная электрическая схема	Параметры базового элемента				Примечание (f -частота источника питания)
		число секций (n)	число витков секций	материал и диаметр провода (мм)	материал и вид сердечника	
$R \rightarrow L$	Рис. 3, а	2	50	ПЭЛШО $\varnothing 0,1$	феррит, сердечник броневого	$f = 1 \text{ кГц} = \text{const}$
$\omega \rightarrow L$	Рис. 3, а	2	300	ПЭВ-2-0,1	пермаллой, сердечник Ш-образный	$R = 470 \text{ Ом}$
$C \rightarrow L$	Рис. 3, б	2	255	ПЭВ-2-0,1	феррит, сердечник кольцевой	$f = 1 \text{ кГц} = \text{const}$
$\omega \rightarrow L$	Рис. 3, б	2	50	ПЭЛШО $\varnothing 0,1$	феррит, сердечник броневого	$C = 2,5 \text{ мкФ}$

ления формой зависимости $A(B)$ путем соответствующего подбора или изменения параметров базовых или управляющих составных элементов.

Рассмотренные устройства, реализующие амплитудно-фазовый способ управления реактивностями изменением результирующего поля, могут быть использованы в различных по назначению радиоэлектрических системах в качестве элементов варьируемых или адаптирующихся избирательных схем, корректирующих цепей, функциональных аналоговых преобразователей и для других целей. Например, при реализации способа измерения массы вещества в резервуаре [3] самоварьирующиеся с изменением частоты питающего напряжения реактивности нашли применение для построения адаптирующегося фазокорректирующего звена в авторезонансном измерительном устройстве. Это позволило существенно упростить структуру названного звена по сравнению с вариантом его, построенным на существующих управляемых реактивностях и требующим для этой цели организации по типу замкнутых систем автоподстройки, и обеспечить работоспособность авторезонансного измерительного устройства.

К недостаткам рассмотренных устройств следует отнести одновременную зависимость их реактивностей от двух параметров: 1) величины управляющего сопротивления (Z) и 2) частоты напряжения источника питания. Поэтому самоварьирующиеся с изменением частоты питающего напряжения реактивности, у которых управляющие сопротивления постоянны по величине, имеют большую однозначность характеристики $A(B)$. Пассивные преобразователи для обеспечения однозначности указанной характеристики требуют стабильности частоты питающего напряжения. Недостатком устройств является также переменность величин их добротностей или тангенса угла потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Грохольский, Г. В. Салов. Способ управления реактивными элементами. Авторское свидетельство № 290411.— ОИПОТЗ, 1971, № 2.
2. А. Л. Грохольский, Г. В. Салов. Катушка с регулируемой индуктивностью. Авторское свидетельство № 294183.— ОИПОТЗ, 1971, № 6.
3. Г. В. Салов, Л. Г. Яковлев. Способ измерения массы вещества в резервуаре. Авторское свидетельство № 271051.— ОИПОТЗ, 1970, № 17.

Поступила в редакцию
21 января 1971 г.,
окончательный вариант —
7 апреля 1971 г.