

## О СТРУКТУРЕ И БЫСТРОДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ф. А. ГРИГОРЯН

Рассматривается связь быстродействия с усилением в дроссельных усилителях и усилителях с использованием вращения намагниченности в ферромагнитных анизотропных пленках. На основе полученных аналитических энергетических соотношений и общей структурной схемы сопоставляются основные характеристики усилителей.

Основные свойства бездиодных магнитных усилителей рассмотрены в ряде работ [1, 2, 3, 4] графическим, графо-аналитическим и аналитическим методами. За последние годы начата разработка усилителя, принцип которого основан на вращении намагниченности в ферромагнитных пленках под воздействием взаимно перпендикулярных полей [5]. Разрабатываются также элементы логики на указанном принципе [6].

Выявление общей структуры усилителей требует общности как способа решения, так и исходных характеристик магнитного материала. Эти же условия необходимы для оценки относительного быстродействия усилителей в одноконтном и многоконтном режимах.

Основные виды дроссельных магнитных усилителей в данной работе рассматриваются при характеристике магнитного материала  $B=f(H)$  в виде линии с одним изломом при импульсном входе и импульсном питании.

### Несбалансированные дроссельные усилители в одноконтном режиме

Дроссельные магнитные усилители рассматриваются при характеристике магнитного материала  $B=f(H)$  в виде линии с одним изломом, представленной на рис. 1а. Основные разновидности несбалансированных дроссельных магнитных усилителей с параллельным и последовательным включением выходной нагрузки представлены на рис. 1б, рис. 1в.

В приведенных дроссельных магнитных усилителях усиление можно характеризовать распределением энергии в элементах, сочетающих  $LR$ ,  $LC$ , в зависимости от скорости изменения потока в индуктивности от действия импульсов входа и питания. Усиление определяется отношением выходной энергии к входной.

Рассмотрим энергетические соотношения для отдельных схем.

1. *Параллельное включение дросселя с нагрузкой.* Для схемы, представленной на рис. 1в, в случае емкостной нагрузки  $C$ , энергия  $E_c$ ,

вводимая через входную цепь для установки потока на величину  $\Phi$ , определяется выражением

$$E_c = \frac{\Phi^2}{2L} + \frac{C}{2} \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

где первый член определяет энергию, накапливаемую в индуктивности  $L$ , второй—в емкости. Этим же выражением определится энергия, выделенная импульсом питания в выходную емкость, и индуктивность при возврате потока к исходному значению.

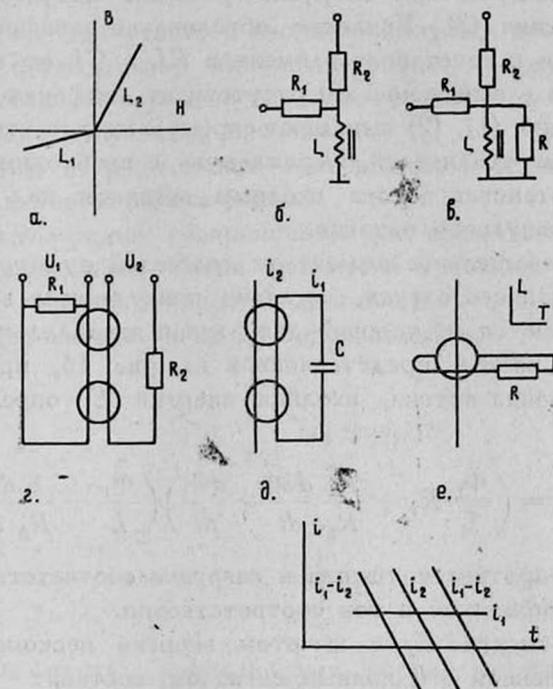


Рис. 1. Усиление на магнитных материалах. а) характеристика магнитного материала, б) дроссельный усилитель с последовательной нагрузкой, в) дроссельный усилитель с параллельной нагрузкой, г) сбалансированный дроссельный усилитель, д) параметрон, е) усилитель с вращением намагниченности, ж) кривые токов параметрона на участке изменения индуктивности.

Случаю активной нагрузки  $R$  соответствует выражение энергии

$$E_R = \frac{\Phi^2}{2L} + \frac{1}{R} \Phi \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

а случаю индуктивной нагрузки  $L_1$  —

$$E_L = \frac{\Phi^2}{2L} + \frac{\Phi^2}{2L_1}. \quad (3)$$

При выводе выражений (1), (2), (3) принято постоянство скорости изменения потока, что не уменьшает общности рассматриваемых задач.

Соотношения (1), (2) содержат основной принцип усиления в одноконтурном режиме. Усиление имеет место при форсированном возврате потока импульсом питания. Действительно, при медленной установке потока вводимая энергия определяется первым членом выражений (1) или (2), при форсированном возврате потока выделяемая энергия определяется вторым членом.

В случае индуктивной нагрузки усиление отсутствует, что следует из выражения (3). Усиление обусловлено зависимостью распределения энергии в сочетаниях элементов  $RL$  и  $CL$  от скорости изменения потока, а в выражении (3) отсутствует дифференциальная связь.

Соотношения (1), (2) выражают скрытую многотактность импульсных дроссельных усилителей, выражаемую в необходимости превышения времени установки потока входным сигналом над временем возврата потока импульсом питания.

2. *Последовательное включение дросселей с нагрузкой.* Условия усиления для данного случая, согласно приведенным ниже соотношениям, не отличаются от условий для случая параллельного включения дросселя. Для схемы, представленной на рис. 16, при постоянстве скорости изменения потока, входная энергия  $E_1$  определится выражением

$$E_1 = \int u_1 i_1 dt = \left( \frac{\Phi_1}{L} R_1 + \frac{R_1}{R_2} \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_1}{dt} \right) \left( \frac{\Phi_1}{L} + \frac{1}{R_2} \frac{d\Phi_1}{dt} \right) \frac{T_1}{4}, \quad (4)$$

где  $R_1, R_2$  — сопротивления входа и нагрузки соответственно,  
 $u_1, i_1$  — напряжение и ток соответственно.

Выходная энергия  $E_2$  с вычетом энергии некомпенсированного выхода, не связанной с выходным сигналом, составит

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{u_2^2}{R_2} T_2 - \left( \frac{u_2}{R_1 + R_2} \right)^2 R_2 T_2 = \\ &= \left[ \left( \frac{\Phi^2}{L} + \frac{1}{R_1} \frac{d\Phi_2}{dt} \right) R_2 - \frac{d\Phi_2}{dt} \right]^2 \frac{R_1^2 + 2R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 R_2} T_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $T_1, T_2$  — длительность входных и выходных сигналов соответственно;

$\Phi_1, \Phi_2$  — потоки, устанавливаемые входным сигналом и подкачкой соответственно.

При малой длительности импульсов по сравнению с постоянной времени цепей из выражений (4) и (5) получим

$$\frac{E_2}{E_1} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \frac{R_2}{R_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

при условии близости величин сопротивлений  $R_2$  и  $R_1$ , что диктуется

необходимостью уменьшения тока дебаланса на выходе. Условие усиления (6) не отличается от выражения (2) для случая параллельного включения дросселя с нагрузкой. При синусоидальности тока питания и входного сигнала, согласно [1], условие усиления (6) или (2) выражается в необходимости превышения частоты тока питания над частотой входного сигнала.

### Сбалансированные дроссельные усилители в многотактном режиме

Воздействие однократного входного импульса на выходной сигнал при наличии последующих импульсов питания обусловлено большой величиной постоянной времени входного контура по сравнению с интервалами между импульсами питания.

Рассмотрим энергетическое соотношение и установление выходного сигнала в многотактном режиме.

1. *Энергетические соотношения для схемы сбалансированного дроссельного усилителя.* Схема усилителя приведена на рис. 2. Потокосцепление первого и второго дросселей  $\psi_1$  и  $\psi_2$  при прямоугольности импульсов питания и входа определится как

$$\psi_1 = \frac{1}{2} \int_{t_n}^{t_m} (u_1 + u_2) dt, \quad (7)$$

$$\psi_1 - \psi_2 = \int_0^{t_n} u_1 dt, \quad (8)$$

$t_n$  — время начала переключения потока магнитопроводов при  $n$ -ном такте подкачки;

$t_m$  — время завершения переключения потока питающим напряжением, время входа в насыщение одного из магнитопроводов.



Рис. 2. Структура усилителей на магнитных материалах.

Условие переустановки потока питающим напряжением за один такт при смещенности потока входным сигналом за  $n$  тактов выразится как

$$\frac{1}{2} \int_{t_n}^{t_m} u_2 dt = \int_0^{t_n} u_1 dt. \quad (9)$$

Выделение энергии за такт в выходную нагрузку определится выражением

$$\frac{dE_2}{dn} = \int_{t_n}^{t_m} \frac{u_2^2}{R_2} dt. \quad (10)$$

Энергия  $E_1$ , затраченная входным сигналом на установку потока, при небольшой скорости изменения входного сигнала, позволяющей не учитывать выделение энергии входного сигнала непосредственно на выходную нагрузку, определится выражением

$$E_1 = \frac{\psi_1^2}{2L} = \frac{1}{2L} \left( \int_0^{t_n} u_1 dt \right)^2, \quad (11)$$

где  $L$  — индуктивность дросселя.

Из выражений (9), (10), (11) с учетом постоянства величины  $u_2$  получим

$$E_2 = \frac{\sqrt{2L}}{R_2} u_2 \int_0^n E_1^{1/2} dn. \quad (12)$$

Таким образом, наличие звена хранения входного сигнала обуславливает дополнительное усиление в многотактном режиме.

Интегральная связь выхода со входом позволяет иметь неограниченное усиление при увеличении числа тактов.

2. *Установление выходного сигнала при активной нагрузке.* При малой длительности импульсов по сравнению с постоянной времени цепей, что обычно соблюдается в магнитных усилителях, для схемы, приведенной на рис. 1г, расхождение потокоцеплений  $\Delta\psi$  первого и второго дросселей определится как

$$\Delta\psi = u_1 t_1 + \frac{u_1 R_2 - u_2 R_1}{R_1 + R_2} \left( \frac{T}{2} - t_1 \right). \quad (13)$$

Первый член правой части определяет расхождение потоков за время  $t_1$ , когда дроссели не насыщены, второй — при насыщении одного из дросселей. Время  $t_1$  изменения потокоцепления от значения  $\psi$  в начале такта до насыщения  $\psi_n$  определится как

$$t_1 = 2 \frac{\psi_n - \psi}{u_1 + u_2}. \quad (14)$$

Разделив обе части уравнения (13) на половину периода и перейдя от приращений к дифференциалу, получим

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{2}{T} u_1 t_1 + \frac{u_1 R_2 - u_2 R_1}{R_1 + R_2} \left(1 - \frac{2t_1}{T}\right). \quad (15)$$

Подставляя значение  $t$  из выражения (14) в выражение (15) и решая дифференциальное уравнение, получим

$$\psi = \left[ \psi_0 + \frac{T}{4} \left( u_1 \frac{R_2}{R_1} - u_2 \right) \right] \left( 1 - e^{-\frac{4R_1}{R_1+R_2} \frac{t}{T}} \right) + \psi_0 e^{-\frac{4R_1}{R_1+R_2} \frac{t}{T}}. \quad (16)$$

Для получения сбалансированного выхода, определяемого отсутствием выходного сигнала при условии отсутствия входного, согласно уравнению (16) следует соблюдать условие  $u_2 = \frac{4\psi_0}{T}$ .

Второй член уравнения (16) характеризует самозапирание усилителя при отсутствии входного сигнала и наличии начального расхождения потоков сердечников.

3. Установление выходного сигнала при емкостной нагрузке. На рис. 1д приведена схема усилителя при емкостной нагрузке. Обычно приведенная схема при соблюдении условия резонанса применяется для возбуждения субгармонических колебаний. На рис. 1ж приведены кривые токов подкачки  $i_2$  субгармоники  $i_1$  для участка временной оси, когда контуры подкачки и субгармоники связаны. Зона связи цепи подкачки с субгармоническим контуром определяется временем прохождения суммарных  $i_1 + i_2$  и разностных  $i_1 - i_2$  токов через нулевое значение, что позволяет написать соотношение

$$\frac{2i}{\Delta t} = \frac{di_2}{dt}, \quad (17)$$

где  $\Delta t$  — время связанного состояния контуров,  
 $i$  — ток субгармоники на участке связи.

При малом напряжении на конденсаторе, что соблюдается на участке связи ввиду резонансных условий, из уравнений контуров следует

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta L}{L} \frac{di_2}{dt}, \quad (18)$$

где

$$\Delta L = L_2 - L_1, \quad L = L_2 + L_1,$$

$L_1, L_2$  — индуктивности дросселей на участках характеристики  $B = f(H)$  до и после излома.

Заменяя в первой части уравнения (18) дифференциалы конечными приращениями и решая его совместно с выражением (17), получим

$$\Delta i = 2 \frac{\Delta L}{L} i. \quad (19)$$

Далее, разделив обе части уравнения (19) на  $1/2$  периода субгармо-

ники и перейдя от приращений к производной, получим дифференциальное уравнение, решением которого является выражение

$$i = i_0 e^{4 \frac{\Delta L}{L} \frac{t}{T}}, \quad (20)$$

где  $i_0$  — начальный сигнал.

Неограниченный рост выходных сигналов согласно выражению (20) в отличие от случая, представленного выражением (16), обусловлен наличием звена накопления — выходной емкости и положительной обратной связи в усилителе. Таким образом, структурно параметрон представляется дроссельным магнитным усилителем, накапливающим звеном и положительной обратной связью.

Условием установления колебаний в параметроне является наличие второго излома характеристики  $B = f(H)$  дросселей. Вторым изломом обуславливает появление дополнительных зон связи между контурами входного сигнала и питания, приводящих как к сдвигу фазы начальных колебаний, так и к ограничению амплитуды [7]. Согласно выражениям (16) и (20) в сбалансированных магнитных усилителях усиление не зависит от величины тока питания при значительном его превышении над входным током. Отсутствие зависимости обусловлено сужением зоны связи между контурами с увеличением тока питания. Подобное ограничение усиления не имеет места в случае, характеризуемом выражениями (1) и (2).

#### Усилитель на основе вращения намагниченности взаимно перпендикулярными полями

Схема усилителя с вращением намагниченности приведена на рис. 1е. Здесь при помощи токопровода, направленного параллельно легкой оси намагничивания, вектор намагниченности предварительно устанавливается параллельно трудной оси намагничивания. Под воздействием входного сигнала, подаваемого на токопровод, параллельный трудной оси намагничивания, вектор намагниченности отклоняется от трудной оси. После этого под воздействием силы анизотропии пленки или же дополнительного смещающего поля, направленного по трудной оси намагничивания, вектор намагниченности отклоняется к легкой оси анизотропии, выделяя в токопровод, параллельный трудной оси, энергию, большую энергии, затраченной на предварительное отклонение. Усиление в этом случае определяется соотношением

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{H_k L}{M(1 - \cos \Delta\varphi)^2}, \quad (21)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  — входная и выходная энергии соответственно,

$H_k$  — напряженность анизотропии,

$L$  — индуктивность входного контура,

$M$  — намагниченность насыщения,

$\Delta\varphi$  — угол дисперсии анизотропии ферромагнитной пленки.

В данном случае вводимая энергия для установки потока, согласно (21), не зависит от скорости установки. Выходная энергия также не зависит от скорости изменения поля. Таким образом, усилители с вращением намагниченности являются усилителями особого класса, где в отличие от дроссельных, усиление не обусловлено скоростью изменения намагниченности.

### Структурная схема усилителей для многотактного режима

Рассмотренные соотношения приводят к заключению, что с точки зрения связи быстродействия с усилением многотактные магнитные усилители можно представить структурной схемой, состоящей из звеньев хранения вводимого сигнала, одноконтурного усиления, накопления и положительной обратной связи.

Общая структурная схема приведена на рис. 2. Одноконтурные усилители представляются усилителями с форсировкой переключения или усилителями на основе вращения намагниченности. Звено накопления представляется статическим и динамическим накапливающими элементами.

Рассмотрим примечательный случай со статическим накапливающим звеном. Статическое накопление имеет место в ферромагнитной анизотропной пленке в виде частично намагниченного состояния. Подобное состояние образуется после намагничивания пленки по направлению трудной оси и снятия внешних полей. При этом ферромагнитная пленка разбивается на домены с противоположно направленной намагниченностью, параллельной легкой оси. Накапливающим звеном при этом является ферромагнитная пленка. Выходной сигнал пленки определяется остаточной намагниченностью.

Замена динамического запоминающего звена статическим позволяет перейти от синусоидальных сигналов к импульсным с произвольной скважностью, сохраняя усилительные свойства, обусловленные многотактностью. Статическое накапливающее звено исключает необходимость повышения добротности контура с повышением скважности импульсов для сохранения усилительных свойств в многотактном режиме.

На рис. 3, 4 представлены осциллограммы возрастания субгармонических колебаний параметрона и импульсных сигналов многотактного усилителя со статическим звеном накопления.

Сходность картины возрастания подтверждает однотипность структуры усилителей. Наличие статического запоминающего звена позволяет получить многотактное усиление при импульсных сигналах с большой скважностью, что видно из осциллограммы.

Из рассмотрения можно установить следующее:

1. Получены энергетические соотношения, характеризующие связь усиления с быстродействием в одноконтурном и многотактном режимах для основных типов дроссельных магнитных усилителей при характе-

ристике магнитного материала  $B = f(H)$  в виде линии с изломом при импульсном входе и импульсном питании.

2. Усилители с вращением намагниченности отличаются от дроссельных магнитных усилителей отсутствием связи усиления со скоростью изменения намагниченности, являясь тем самым усилителями особого класса. Наличие подобной связи обуславливает скрытую многотактность дроссельных магнитных усилителей.

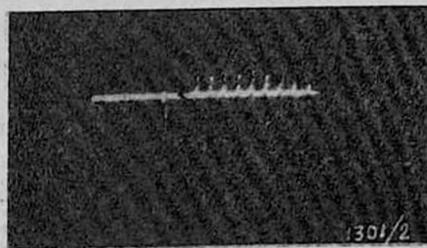


Рис. 3. Осциллограмма выходных импульсов усилителя с вращением намагниченности.

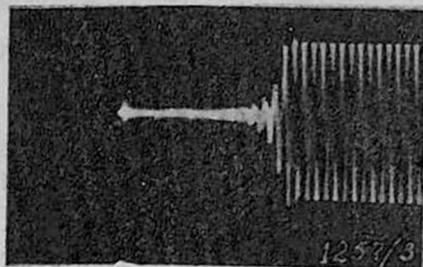


Рис. 4. Осциллограмма выходного тока параметрона.

3. Выведенные основные соотношения для многотактных усилителей позволяют представить их структурной схемой, состоящей из звеньев хранения входного сигнала, однетактного усиления, накопления выходного сигнала и положительной обратной связи.

4. Замена динамического накапливающего звена статическим позволяет осуществить переход от синусоидальных сигналов к импульсным с произвольной скважностью, сохраняя усиление многотактного режима.

Ереванский научно-исследовательский  
институт математических машин

Поступила 15 июля 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Розенблат, Магнитные усилители, Изд. Сов. радио, М. (1960).
2. Г. Ф. Сторм, Магнитные усилители, Изд. ИЛ, М. (1957).
3. Г. Амтура, Магнитные усилители, Энергоиздат, М.—Л. (1963).
4. E. W. Manteuffel, Communication and Electronics, 6, 473 (1960).
5. Ф. А. Григорян, Способ усиления импульсных сигналов, Авторское свидетельство № 172553 с приоритетом 1.2.64.
6. I. G. Edwards, Electronics Record, 1, 40 (1965).
7. Ф. А. Григорян, Т. П. Асабян, Изв. АН АрмССР, сер. техническая, 19, № 5, 15 (1966).

ԻՄՊՈՒԼՍԱՑԻՆ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ՈՒԺԵՂԱՑՈՒՑԻՑԻՉՆԵՐԻ  
ՍՏՐՈՒԿՏՈՒՐԱՆ ԵՎ ԳՈՐԾՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆԸ

Յ. Հ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

Ստացված են անալիտիկ էներգետիկ հարաբերություններ, որոնք ընդունում են ուժեղացման կապը ուղացման հետ, իմպուլսային մուտքի և իմպուլսային սնման դեպքում:

Դիտվում են զրոսելային մագնիսական ուժեղացուցիչները ազդելով, ինդուկտիվ և ունակային ելքի դեպքում, միատակտ և բազմատակտ ռեժիմներում: Դիտված է նաև ուժեղացուցիչ, որը հիմնված է անիզոտրոպ ֆերրոմագնիսական թաղանթում մագնիսացվածության ուղղության պտտման երևույթի վրա: Ստացված արտահայտությունները հիման վրա բերվում է ընդհանուր ստրուկտուր սխեմա մագնիսական ուժեղացուցիչների համար, որը կազմված է մուտքի ազդանշանը պահպանող, մի տակտում ուժեղացնող, կուտակող օգակներից և դրական հետադարձ կապից:

Ցույց է տրված, որ դինամիկ կուտակող օգակի փոխարինումը ստատիկ օգակով թույլ է տալիս սինուսոիդալ ազդանշաններից անցնել իմպուլսայինի, պահպանելով բազմատակտ ռեժիմին հատուկ ուժեղացումը:

Այդ փոխարինումը հնարավոր է այն ուժեղացուցիչում, որը հիմնված է ֆերրոմագնիսական բարակ անիզոտրոպ թաղանթում մագնիսացվածության ուղղության պտտման երևույթի վրա:

ON STRUCTURE AND SPEED OF THE PULSE AMPLIFIERS  
WITH MAGNETIC MATERIALS

F. H. GRIGORIAN

The relationship between speed, gain and mode of setting of output pulses in single cycle and multicycle operation pulse amplifiers with magnetic materials are discussed.

Choke-coupled magnetic amplifiers and amplifiers with rotational magnetisation are compared to show different modes of amplification and to give a general structure for both classes of amplifiers from multicycle amplification point of view.