УДК 681.314

ГИРАТОР В ИСТОЧНИКАХ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

И.С.Сергеев, В.М.Петров

THE GYRATOR IN SECONDARY POWER SUPPLIES

I.S.Sergeev, V.M.Petrov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, servanser@mail.ru

Применение моточных элементов (катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов) в источниках вторичного электропитания приводит к достаточно низким значениям КПД, а также недостаточно высоким массо-габаритным параметрам. Поэтому моточные изделия часто заменяют схемотехническими решениями, к которым относится гиратор на операционном усилителе. К преимуществам гиратора на основе магнитоэлектрических композиционных материалов следует отнести то, что он может быть использован как отдельный электрический элемент, являющийся недиссипативным преобразователем тока в напряжение в области электромеханического резонанса. В работе проведены экспериментальные исследования гираторных свойств слоистой магнитоэлектрической структуры на основе цирконата-титаната свинца и метгласа. Определено оптимальное сопротивление нагрузки, соответствующее максимуму КПД.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, слоистая магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура, гиратор, электромеханический резонанс

The use of coil-winding elements (inductance coils, filter chokes, and transformers) in secondary power supplies is often not enough in terms of efficiency, and the circuit has large dimensions. Therefore, coil-winding elements are often replaced by multipleelement circuits that include elements such as a capacitor, resistor, and operational amplifier. Such schemes are considered as implementations of gyrator. The big advantage of the magnetoelctric gyrator is that it can be used as an individual element with nondissipative current-to-voltage conversion in the EMR region. Experimental studies of magnetoelectric coupling for laminates based on lead zirconate-titanate and metglass are carried out. Optimum load resistance corresponding to maximal efficiency has been determined.

Keywords: magnetoelectric effect, layered magnetostrictive-piezoelectric structure, gyrator, electromechanical resonance

Введение

Применение моточных элементов (катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов), зачастую либо недостаточно по КПД, либо схема приобретает большие габариты. Так, в ИВЭП (источник вторичного электропитания) дроссели и трансформатор дают малое КПД. Поэтому моточные изделия стараются заменить схемотехническими решениями, включающими в себя такие элементы, как конденсатор, резистор, операционный усилитель. Такие схемы считаются примером гиратора. Во всех схемах используется операционный усилитель с высоким входным сопротивлением.

Схематическое решение замены моточных изделий гиратором часто используется, но не практично, так как схемы в основном имеют довольно большие габариты по сравнению с объектом исследования. В этом и заключается актуальность данной работы. Данная работа направлена на исследование возможности заменить моточные изделия отдельным самостоятельным элементом под названием гиратор.

Гиратор представляет собой 2-плечевой 4-полюсный элемент, который был предложен в качестве пассивного элемента электрической цепи Теллегеном в 1948 г. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности и трансформатор — пассивные элементы электрической цепи, Теллеген предложил гиратор как пятый элемент. Этот элемент предлагает возможность реализации идеальных трансформаторов за счет прямого ток-напряжение (I-U) или обратного напряжение-ток (U-I) преобразования. Также за счет этого элемента индуктивность сможет вести себя как емкость и наоборот.

Идея Теллегена о гираторе предполагала существование магнитоэлектрических материалов однофазных либо двухфазных, но открыли их позже. Однако при отсутствии гиратора были разработаны схемы с его характеристиками с помощью других четырех электрических элементов.

Гиратор может быть реализован на основе сегнетоэлектрических и ферромагнитных материалов [1-3]. В течение последних 30 лет гигантский магнитоэлектрический (МЭ) эффект был обнаружен в композитах на основе пьезоэлектрических и магнитострикционных матеоиалов. Недавно МЭ гиратор был исследован на основе трехслойной структуры Terfenol-D/PZT/Terfenol-D. Эти исследования установили, что данный образец имеет некоторые свойства гиратора [4]:

1) самостоятельный электрический элемент;

эффективный недиссипативный преобразователь *I-U* в области электромеханического резонанса (ЭМР);

3) однонаправленный, т.е. импеданс инвертор работает только в одном направлении.

МЭ гираторы имеют важное применение в качестве устройств усиления напряжения, датчиков тока и других устройств преобразования энергии. В области ЭМР наблюдается усиление МЭ взаимодействия в композитах. Когда частота переменного магнитного поля H_{ac} приближалась к резонансной частоте слоистой структуры, МЭ коэффициент по напряжению возрастает, и соответственно увеличивается индуцированное напряжение в пьезоэлектрическом слое. Таким образом, в области ЭМР наблюдается значительный рост выходного напряжения, индуцированное поредством МЭ эффекта, что может быть использовано при проектировании миниатюрных трансформаторов.

МЭ слоистая структура с катушкой, несущей ток I_{in} , имеет уникальную возможность преобразования тока в напряжение. МЭ образцы фактически выступают в качестве преобразователя *I*-*U* с высоким коэффициентом преобразования.

В композиционных материалах МЭ эффект является результатом взаимодействия пьезоэлектрических и пьезомагнитных свойств. Механизмы прямого и обратного МЭ эффекта состоят в следующем:

1. Прямой МЭ эффект:

1.1. Пьезомагнитный материал деформируется при приложении внешнего магнитного поля.

1.2. Возникают механические напряжения в пьезоэлектрической компоненте.

1.3. Возникает электрическая поляризация вследствие пьезоэлектрического эффекта.

2. Обратный МЭ эффект:

2.1. Внешнее электрическое поле вызывает деформацию пьезоэлектрической компоненты.

2.2. Возникают механические напряжения в пьезоэлектрической компоненте.

2.3. Пьезомагнитная компонента намагничивается благодаря пьезомагнитному эффекту.

Соответственно, композиционный материал характеризуется новым свойством — магнитоэлектрическим эффектом. Физические свойства композитных структур, состоящих из двух или более фаз (пьезоэлектрической и магнитострикционной), определяются свойствами каждой из фаз в отдельности, а также их взаимодействием. Целью данной работы является исследование гираторных свойств магнитоэлектрической слоистой структуры метглас—ЦТС—метглас.

Методика эксперимента и результаты измерений

Для проведения эксперимента были изготовлены лабораторные образцы слоистой структуры (рис.1), состоящие из пьезоэлектрического диэлектрика ЦТС и магнитострикционного металла метглас.



Рис.1. Образец слоистой структуры: 1 — ЦТС; 2 — метглас

Последовательность изготовления лабораторного образца состоит в следующем:

1. Вырезается пластинка ЦТС размером 22×1×0,5 мм.

2. Вырезаются 6 пластин метглас размером 22×1×0,025 мм.

3. С помощью клея БФ-2 ГОСТ 12172-74 склеиваем метглас и ЦТС, устанавливая с каждой стороны ЦТС по 3 пластинки метглас.

4. Образец высушивается под пресс в течение 12-24 часов.

Таким образом, у нас получился образец слоистой структуры размером 22×1×0,65 мм

После того как элемент был готов, требовалось проверить его работоспособность. Для этого была изготовлена катушка диаметром 0,8 см и числом витков 26 из проволоки диаметром 0,08 мм.

Для контроля качества изготовленного образца была измерена амплитудно-частотная характеристика образца при помещении его в катушку (рис.2,3) и подключении к генератору (на входе) и к осциллографу (на выходе), как показано на рисунке.



Рис.2. Образец в катушке



Рис.3. Схема включения образца с катушкой

Затем с помощью магнита создавалось постоянное магнитное поле, как показано на рис.4.



Рис.4. Схема подмагничивания образца. 1 — магнит

На экране осциллографа наблюдалась амплитудно-частотная характеристика гиратора. Полученные данные представлены на рис.5.



Рис.5. График зависимости индуцированного напряжения от частоты

МЭ эффект существенно возрастает в области ЭМР, при этом максимальное значение индуцированного напряжения амплитудой 3,96 В наблюдается на частоте 80 кГц. А значит, изготовленный образец обладает хорошими магнитоэлектрическими свойствами. Ширина резонансной линии равна приблизитнльо 2 Гц, поэтому последующие показания приборов могут отличаться. Для уменьшения погрешности измерений перед каждым измерением на частоте ЭМР находилось резонансное значение выходного напряжения. Проверка гираторных свойств магнитоэлектрической слоистой структуры на преобразовании емкости и индуктивности производилась с помощью LCR-метра «Programmable LCR Bridge HM8118», при этом амплитуда входного сигнала устанавливалась равной 1 В. В ходе эксперимента исследовался эффект прямой гирации (преобразование индуктивности в емкость), а также эффект обратной гирации (преобразование емкости в индуктивность).

В первом случае схема включения остается такой же, как на рис.2, 3 и 4, при этом генератор подключается к входу гиратора, а осциллограф — к выходу. Во втором случае схема включения приобретет иной вид, показанный на рис.6 и 7, при этом измерение индуктивности и емкости производится при отключенном осциллографе.



Рис.6. Схема образца при обратном действии гирации: 1 — конденсатор; 2 — образец; 3 — катушка; 4 — магнит



Рис.7. Схема включения образца с внешней емкостью для снятия показаний

Прямой эффект измерялся в свою очередь тоже двумя способами. Изменялась индуктивность сменой катушек непосредственно на образце и изменялась индуктивность внешними катушками, подключенными параллельно основной.

Изменение индуктивности внешних катушек, подключенных параллельно основной катушке, приводило к незначительному изменению выходной емкости от 2,1509 нФ до 2,1517 нФ. Однако изменение индуктивности путем смены катушек на элементе дало заметный результат, как это показано в виде графика на рис.8 и в виде табл.1.

Таблица 1 Результаты измерений прямого эффекта гирации

<i>N</i> , витков	26	20	16	10	8
С, нФ	2,15	2,21	2,22	2,23	2,24
<i>L</i> , мкГн	7,9	4,6	3,4	2,5	2



В процессе измерений обратного эффекта гирации к образцу подключалась дополнительная внешняя емкость. Собственная емкость образца составляла 2,8 нФ, число витков катушки индуктивности равно 26.

Данные измерений представлены в виде графика на рис.9 и в виде табл.2.

L, MKTH



Рис.9. График зависимости индуктивности от емкости

Таблица 2

Результаты измерений обратного эффекта гирации

$C_{\scriptscriptstyle \mathrm{BH}}$, н Φ	$C_{\text{пол}}$, н Φ	L , мк Γ н
0,99	3,7	4,2
5,1	7,9	4
7,6	10,4	3
9,11	11,91	1,4

Для исследования зависимости индуктивности от частоты при постоянной емкости использовалась схема включения образца, такая же, как на рис.6 при собственной емкости образца и при параллельно включенной внешней емкости. На вход подключаем генератор с амплитудой 1 В, а на выход — осциллограф. Изменяя частоту от 0,1 кГц до 100 кГц, измеряем индуктивность катушки, предварительно отключив перед каждым замером осциллограф. То же делаем для параллельно включенных емкостей, сначала 3 нФ, затем 7 нФ. Результаты приведены в виде графика на рис.10. По графику при собственной емкости образца $(C_1 = 2,8 \text{ н}\Phi)$ видно, что при частоте от 1 до 1,009 кГц значение индуктивности колеблется от 6 до -7,7 мкГн, а при частотах менее 1 кГц и более 1,01 кГц значение индуктивности колеблется от 0,45 до 0,5 мкГн. Также по графикам заметен сдвиг колебаний по оси абсцисс при полной (внутренней емкости образца и внешней емкости конденсатора) емкости ($C_2 = 5,8h\Phi$) и оси ординат при полной номинальной емкости ($C_3 = 9,8 \text{ н}\Phi$).



Рис.10. Графики зависимостей индуктивности от частоты при разных номинальных емкостях

Для измерения активного входного и выходного напряжения требуется на вход и выход системы включить резистор, как показано на рис.11. В данном случае на вход был поставлен резистор 0,1 Ом, а на выход — 1, 1.5, 2.5 кОм поочередно. Входное напряжение измерялось на R1, выходное — на R2. Значение резистора R2 подбиралось для получения максимального КПД. Для измерений использовался цифровой прецизионный мультиметр Rohde&Schwarz Hameg HM8112-3. Результаты измерений приведены в табл.3.



Рис.11. Схема включения с резисторами для измерения напряжений

Таблица 3

$U_{\scriptscriptstyle \mathrm{BX}},\mathrm{B}$	$U_{\text{вых}}, \mathbf{B}$	<i>R</i> ₂ , Ом	КПД, %
0,02064	0,52	1000	0,8
0,0205	0,65	1500	13
0,02	1,5	2500	28

Результаты измерений КПД гиратора

По данным измерений проведена оценка МЭ коэффициента по напряжению α_{ME} [1]. Результаты расчета приведены в виде графика на рис.12 и в табл.4.



Рис.12. График зависимости выходного магнитоэлектрического коэффициента от частоты

Таблица 4

Результаты измерения МЭ коэффициента по напряжению

F, кГц	$\alpha_{MEBDIX}, B/cM\cdot \vartheta$	F, кГц	$\alpha_{MEBDIX}, B/cM\cdot \vartheta$
1	0,000834	80	0,063942
2	0,000834	81	0,094523
3	0,000834	82	0,139005
4	0,001112	83	0,208507
5	0,001251	84	0,107034
6	0,001668	85	0,054212
7	0,001807	86	0,044482
8	0,001807	140	0,004726
9	0,001946	87	0,027801
10	0,002363	88	0,041701
11	0,002641	89	0,034751
20	0,003475	90	0,034751
30	0,004865	100	0,0139
40	0,007645	110	0,010286
50	0,004865	120	0,007367
60	0,00973	130	0,005838
70	0,020851		

Для изучения зависимости КПД от сопротивлений $R_{\rm BX}$ от $R_{\rm BMX}$ использовалась схема включения, приведенная на рис.11. Полученные данные представлены в виде табл.5 и графика на рис.13.



Рис.13. График зависимости КПД от сопротивления

Как следует из данных, приведенных на рис. 13, оптимальное сопротивление нагрузки, соответствующее максимальному значению КПД исследуемого гиратора, равно приблизительно 2,5 кОм

Таблица 5

Результаты измерения КПД гиратора в зависимости от сопротивления

$R_{\rm вых},$ Ом	η, %
1000	0,8
1500	13
2500	28
5000	5

Измеренные значения входного сопротивления гираторы в зависимости от выходного сопротивления представлены в виде табл. 6 и графика на рис. 14.



Рис.14. График зависимости входного сопротивления гиратора от сопротивления на выходе

Таблица 6 Полученные данные измерений входного

сопротивления гиратора

<i>R</i> _{вых} , Ом	$R_{\rm bx}$, Ом
982	0,086
1700	0,0855
11550	0,0851

Анализ полученных данных показывает, что слоистая структура метглас-ЦТС-метглас обладает гираторными свойствами, заключающимися в зависимости выходной емкости от входной индуктивности. КПД исследуемого гиратора достигает 28%.

Заключение

Основные результаты, полученные в работе, заключаются в следующем.

1. Проведены экспериментальные исследования магнитоэлектрических свойств слоистой магнитоэлектрической структуры, включая подготовку образцов слоистых структур и проведение эксперимента по наблюдению МЭ эффекта в области ЭМР.

2. Эксперимент для проверки гираторных свойств магнитоэлектрической слоистой структуры на преобразовании емкости и индуктивности продемонстрировал гираторные свойства образца, так как при изменении емкости на выходе изменяется значение входной индуктивности.

3. Эксперимент по измерению входного и выходного напряжения дал зависимость КПД гиратора от сопротивления нагрузки. Найдено оптимальное значение сопротивления нагрузки. Кроме того, получены значения МЭ коэффициента.

Полученные результаты можно использовать в дальнейших исследованиях, а также для проектирования гираторов на основе МЭ эффекта.

- Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. В.Новгород: НовГУ, 2005. 226 с.
- Туров Е.А., Колчанов А.В., Меньшенин В.В. и др. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. М.: Физматлит, 2001. 560 с.
- Государственный реестр открытий СССР [Электронный ресурс]. URL: http://ross-nauka.narod.ru/06/06-123.html.
- Dong S., Zhai J., Li J.F. et al. Magnetoelectric gyration effect in Tb_{1-x}Dy_xFe_{2-y}/Pb(Zr,Ti)O₃ laminated composites at the electromechanical resonance // Appl. Phys. Lett. 2006. V.89. P.243512.

References

- Bichurin M.I., Petrov V.M., Filippov D.A., Srinivasan G. Magnitoelektricheskii effekt v kompozitsionnykh materialakh [Magnetoelectric effects in composites]. Veliky Novgorod, NovSU Publ., 2005. 226 p.
- Turov E.A., Kolchanov A.V., Men'shenin V.V., Mirsaev I.F., Nikolaev V.V. Simmetriia i fizicheskie svoistva antiferromagnetikov [Symmetry and physical characteristics of antiferromagnetic materials]. Moscow, "Fizmatlit" Publ., 2001. 560 p.
- Gosudarstvennyi reestr otkrytii SSSR [The USSR State Register of scientific discoveries]. Available at: http://rossnauka.narod.ru/06/06-123.html.
- Dong S., Zhai J., Li J.F., Viehland D., Bichurin M.I. Magnetoelectric gyration effect in Tb_{1-x}Dy_xFe_{2-y}/Pb(Zr,Ti)O₃ laminated composites at the electromechanical resonance. Applied Physics Letters, 2006, vol. 89, p. 243512.