

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 582 080** ⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК

H03H 5/12 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: [2014128833/07](#), 14.07.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.07.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.07.2014

(43) Дата публикации заявки: 10.02.2016 Бюл. № [4](#)

(45) Опубликовано: [20.04.2016](#) Бюл. № [11](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 6481 U1, 16.04.1998. EP 1286465 A1, 26.02.2003. SU 714422 A, 05.02.1980. SU 1469510 A1, 30.03.1989. GB 695186 A, 05.08.1953.

Адрес для переписки:

394026, г. Воронеж, Московский пр-кт, 14,
ГОУВПО "ВГТУ", патентный отдел

(72) Автор(ы):

**Бочаров Михаил Иванович (RU),
Новожилов Олег Петрович (RU)**

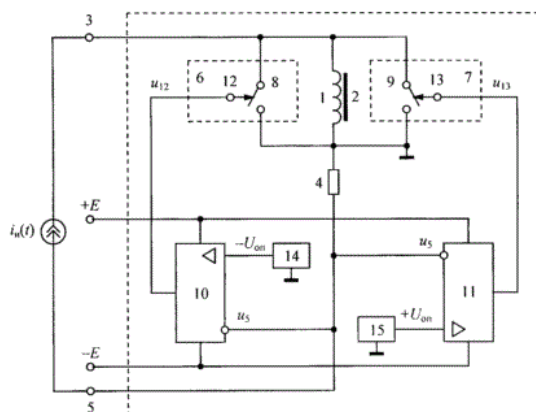
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Воронежский государственный
технический университет" (RU)**

(54) **ФЕРРОМАГНИТНЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в электрических установках и радиотехнических устройствах в качестве ферромагнитного нелинейного элемента (ФНЭ) для преобразования электрической электромагнитной энергии в область повышенных частот, стабилизации напряжения и других целей. Технический результат состоит в уменьшении мощности потерь в режиме глубокого насыщения. ФНЭ содержит катушку индуктивности, выполненную на магнитопроводе, резистор, первый и второй управляемые ключи, первый и второй компараторы, источник опорного напряжения отрицательной полярности и источник опорного напряжения положительной полярности. Изобретение позволяет существенно уменьшить токи, протекающие через катушку ферромагнитного нелинейного элемента, до величины в точке излома ампервеберной характеристики, при которой ферроматериал переходит в режим насыщения. 3 ил.



Фиг. 1

Изобретение относится к области электротехники и может использоваться в электротехнических установках и радиотехнических устройствах в качестве нелинейного ферромагнитного элемента (ФНЭ) для преобразования электромагнитной энергии в область повышенных частот, стабилизации напряжения и других целей.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому устройству является ФНЭ [1], содержащий катушку индуктивности, выполненную на магнитопроводе, первый вывод которой является первым внешним зажимом ФНЭ.

Недостатком известного ФНЭ являются большие потери мощности при работе в режиме глубокого насыщения, когда через катушку протекают большие токи, обусловленные малой индуктивностью, и поэтому на омическом сопротивлении обмотки создаются большие потери мощности. Причем, чем больше витков содержит катушка индуктивности, тем больше мощность потерь.

Изобретение направлено на уменьшение мощности потерь в режиме глубокого насыщения.

Это достигается тем, что в ФНЭ, содержащий катушку индуктивности, выполненную на магнитопроводе, первый вывод которой является первым внешним зажимом ФНЭ, введены резистор, первый вывод которого является вторым внешним зажимом ФНЭ, а второй соединен со вторым выводом катушки индуктивности и является общей точкой, первый управляемый ключ (УК) и второй УК, первые силовые выводы которых подсоединены к первому внешнему зажиму ФНЭ, а вторые их силовые выводы подключены к общей точке, первый компаратор и второй компаратор, инвертирующие входы которых соединены со вторым внешним зажимом ФНЭ, при этом выход первого компаратора подсоединен к управляющему входу первого УК, а выход второго компаратора подключен к управляющему входу второго УК, источник опорного напряжения отрицательной полярности, выход которого соединен с не инвертирующим (прямым) входом первого компаратора, источник опорного напряжения положительной полярности, выход которого подсоединен к не инвертирующему входу второго компаратора.

На фиг. 1 приведена схема ФНЭ, содержащая катушку индуктивности 1, выполненную на магнитопроводе 2, первый вывод которой является первым внешним зажимом 3 ФНЭ, введены: резистор 4, первый вывод которого является вторым внешним зажимом 5 ФНЭ, а второй вывод соединен со вторым выводом катушки индуктивности 1 и является общей точкой, первый УК 6 и второй УК 7, первые силовые выводы 8 и 9 которых подсоединены к первому внешнему зажиму 3 ФНЭ, а вторые силовые выводы подключены к общей точке, первый компаратор 10 и второй компаратор 11, инвертирующие входы которых соединены со вторым внешним зажимом 5 ФНЭ, при этом выход первого компаратора 10 подсоединен к управляющему входу 12 первого УК 6, а выход второго компаратора 11 подключен к

управляющему входу 13 второго УК 7, источник опорного напряжения 14 отрицательной полярности, выход которого соединен с не инвертирующим входом первого компаратора 10, а также источник опорного напряжения 15 положительной полярности, выход которого подсоединен к не инвертирующему входу второго компаратора 11.

Управляемые ключи УК 6 и УК 7 выполняются на полупроводниковых диодах (ПД) и биполярных транзисторах (БТ). В качестве примера на фиг. 2 приведен один из вариантов схем ключей. УК 6 (фиг. 2, а) реализован на первом ПД 16 и первом БТ 17 n-p-n типа, а УК 7 (фиг. 2, б) выполнен на втором ПД 18 и втором БТ 19 p-n-p типа. При этом анод ПД 16 подсоединен к силовому выводу 8 УК 6, а его катод подключен к коллектору БТ 17. Катод ПД 18 соединен с силовым выводом 9 УК 7, а анод ПД 18 соединен с коллектором БТ 19. Ниже показано, что полупроводниковые диоды обеспечивают разомкнутое состояние управляемых ключей УК 6 и УК 7 при инверсном состоянии транзисторов БТ 17 и БТ 19.

Рассмотрим принцип работы ФНЭ, для чего воспользуемся рисунками (фиг. 1 и 2) и временными диаграммами (фиг. 3) при условии, что к входным зажимам 3 и 5 ФНЭ (фиг. 1) подключен идеальный источник синусоидального тока (фиг. 3, а)

$$i_n = I_n \sin \omega t, \quad (1)$$

где I_n - амплитуда тока; $\omega=2\pi/T$ - частота колебаний; T - период колебаний.

Ток i_n (1) создает на резисторе 4 напряжение (фиг. 3, а)

$$u_5 = -RI_n \sin \omega t, \quad (2)$$

где R - сопротивление резистора 4.

Резистор 4 используется в качестве датчика тока. Значение R должно быть весьма малым, чтобы не влиять на процессы, протекающие в схеме. Напряжение u_4 с помощью компараторов управляет работой ключей УК 6 и УК 7.

На интервале времени $t_1 \dots t_2$ первый УК 6 находится в замкнутом состоянии, а второй УК 7 - в разомкнутом. Следовательно, катушка индуктивности 1 с помощью УК 6 замкнута накоротко, поэтому ток, протекающий через нее, при замыкании УК 6 в момент $t=t_1$ сохраняет постоянное значение $i_1=I_m=\text{const}$ (фиг. 3, г). При этом потокосцепление, создаваемое катушкой индуктивности 1, $\psi=Li_1=LI_m=\Psi_m=\text{const}$ (фиг. 3, г), где L - индуктивность катушки, а через УК 6 протекает ток $i_6=i_n-i_1=i_n-I_m$ (фиг. 3, б).

Действительно, на этом интервале времени напряжение на инвертирующем входе первого компаратора 10 меньше, чем на не инвертирующем входе, т.е. $u_5 < -U_{оп}$ (фиг. 3, а). Поэтому на его выходе формируется напряжение $u_{12}=+E$ (фиг. 3, б), которое приложено к управляющему входу 12 УК 6 и поддерживает БТ 17 n-p-n типа в открытом состоянии, что обеспечивает замкнутое состояние первого УК 6 и протекание через него тока $i_6(t)$ (фиг. 3, б). Напряжение на инвертирующем входе второго компаратора 11 меньше, чем на не инвертирующем входе $u_5 < +U_{оп}$. Поэтому на его выходе формируется напряжение $u_{13}=+E$ (фиг. 3, в), которое приложено к управляющему входу 13 УК 7 и поддерживает БТ 19 p-n-p типа в закрытом состоянии, что и обеспечивает разомкнутое состояние второго УК 7.

На интервале времени $t_2 \dots t_3$ УК 6 и УК 7 находятся в разомкнутом состоянии и токи через них не протекают, т.е. $i_6=0$ (фиг. 3, б) и $i_7=0$ (фиг. 3, в). Поэтому ток i_n протекает через катушку индуктивности 1 и потокосцепление $\psi=Li_n$ изменяется по тому же закону, что и ток источника (фиг. 3, г).

Действительно, на этом интервале времени напряжение на инвертирующем входе первого компаратора 10 становится больше, чем на не инвертирующем, т.е. $u_5 > -U_{оп}$ (фиг. 3, а) и на его выходе формируется отрицательное напряжение $u_{12}=-E$ (фиг. 3, б). При отсутствии ПД 16 на коллектор БТ 17 n-p-n типа будет также приложено отрицательное напряжение $u_3=Ldi/dt$ (фиг. 3, а). Следовательно, БТ 17 будет находиться в инверсном состоянии и способен пропускать ток на интервале $T/2 \dots t_3$.

Наличие ПД 16 препятствует этому. Напряжение на инвертирующем входе второго компаратора 11 $u_5 < +U_{оп}$, поэтому $u_{13} = +E$ и УК 7 по-прежнему находится в разомкнутом состоянии.

На интервале времени $t_3 \dots t_4$ УК 7 находится в замкнутом состоянии, а УК 6 - в разомкнутом. Следовательно, катушка индуктивности 1 с помощью УК 7 замкнута накоротко, благодаря чему сохраняется постоянное значение тока катушки $i_1 = -I_m = \text{const}$ перед ее замыканием УК 7 в момент времени t_3 (фиг. 3, г). Потокосцепление катушки индуктивности 1 пропорционально протекающему через нее току, поэтому $\psi = Li_1 = -LI_m = -\Psi_m = \text{const}$ (фиг. 3, г), а через УК 7 протекает ток $i_7 = i_n - i_1 = i_n + I_m$ (фиг. 3, в).

Действительно, на этом временном интервале напряжение на инвертирующем входе второго компаратора 11 больше, чем на не инвертирующем, т.е. $u_5 > +U_{оп}$ (фиг. 3, а). Поэтому на его выходе формируется напряжение $u_{13} = -E$ (фиг. 3, в), которое приложено к управляющему входу 13 УК 7 и поддерживает БТ 19 р-п-р типа в открытом состоянии, что обеспечивает замкнутое состояние УК 7 и протекание через него тока $i_7(t)$ (фиг. 3, в). Напряжение на инвертирующем входе первого компаратора 10 больше, чем на не инвертирующем входе ($u_5 > -U_{оп}$). Поэтому на его выходе формируется напряжение $u_{12} = -E$ (фиг. 3, б), которое приложено к управляющему входу 12 УК 6 и поддерживает БТ 17 п-р-п типа в закрытом состоянии, что обеспечивает разомкнутое состояние первого УК 6.

На интервале времени $t_4 \dots t_5$ УК 6 и УК 7 находятся в разомкнутом состоянии и токи через них не протекают, т.е. $i_6 = 0$ (фиг. 3, б) и $i_7 = 0$ (фиг. 3, в). Поэтому ток i_n протекает через катушку индуктивности 1, т.е. $i_1 = i_n$ и потокосцепление $\psi = Li_1$ изменяется по тому же закону, что и ток катушки i_1 (фиг. 3, г).

Действительно, на этом интервале времени напряжение на инвертирующем входе второго компаратора 11 становится меньше, чем на не инвертирующем входе: $u_5 < +U_{оп}$ (фиг. 3, а). Поэтому на его выходе формируется положительное напряжение $u_{13} = +E$ (фиг. 3, в). При отсутствии ПД 18 на коллектор БТ 19 р-п-р типа будет также поступать положительное напряжение $u_3 = L di/dt$ (фиг. 3, а). Следовательно, БТ 19 находится в инверсном состоянии и способен пропускать ток на интервале $T \dots t_5$. Наличие ПД 18 предотвращает протекание тока через УК 7. Напряжение на инвертирующем входе первого компаратора 10 по-прежнему $u_5 < +U_{оп}$, поэтому $u_{12} = -E$ и УК 6 остается в разомкнутом состоянии.

Неопределенные выше на интервале $0 \dots t_1$ значения тока i_1 и потокосцепления $\psi_1(i)$ в силу периодичности протекающих в рассматриваемой схеме процессов должны быть равны значениям $i_1 = I_m$ и $\psi_1 = \Psi_m$, для момента времени t_5 (фиг. 3, г).

Рассмотрение протекающих в ФНЭ процессов позволило выявить форму отклика потокосцепления $\psi(t)$ (фиг. 3, г) при воздействии на него тестового сигнала в виде гармонического тока $i(t) = i_n(t)$ (фиг. 3, а). Исключив в зависимостях $\psi(t)$ и $i(t)$ время t , получим ампервеберную характеристику ФНЭ (см. [2] - стр. 211-215), которая приведена на фиг. 4.

Существенным отличием полученной ампервеберной характеристики от известной (фиг. 4 пунктир) является постоянство потокосцепления в области насыщения.

Таким образом, полезный эффект (уменьшение мощности потерь) достигается благодаря тому, что при внешних токах $i_n > I_m$ и $i_n < -I_m$ катушка индуктивности 1 шунтируется управляющими ключами 6 и 7, поэтому ток i_n через катушку не протекает. Управляемые ключи на практике могут быть реализованы как на основе широко распространенных генераторных БТ, так и с применением современных транзисторов типа IGBT (биполярных транзисторов с изолированным затвором) [3], имеющих очень малое сопротивление в состоянии насыщения (менее 0.1 Ом) и высокое входное сопротивление, что позволяет управлять ключами малыми токами. Кроме того, эти транзисторы имеют большие допустимые напряжения (единицы киловольт) и токи (десятки ампер), т.е. являются хорошими коммутаторами и при

больших уровнях мощностей, а также работают в диапазоне достаточно высоких частот.

Что касается других элементов схемы (компараторов и полупроводниковых диодов), то они выпускаются промышленностью с параметрами, позволяющими выполнить ФНЭ с высоким уровнем реактивных мощностей в диапазоне частот до единиц мегагерц.

Предложенное устройство позволяет существенно уменьшить токи, протекающие через катушку индуктивности ФНЭ до величины I_m - точке излома ампервеберной характеристики, при которой ферромагнитный материал переходит в режим насыщения. Поскольку значение I_m для магнитомягких материалов намного меньше тока глубокого насыщения, при котором работают многие устройства (например, магнитные импульсные модуляторы [4]), то существенно уменьшаются потери в материале, нагрев катушки индуктивности, что повышает КПД и надежность работы устройства.

Кроме этого значительно уменьшаются габариты и масса ФНЭ благодаря уменьшению площади окна магнитопровода путем выбора моточного провода катушки индуктивности 1 с меньшим диаметром. Что касается элементов цепи управления, то они являются малогабаритными с малыми потребляемыми токами, работают при малых напряжениях и выполняются в виде интегральных, поэтому их влияние на габариты устройства не является существенным.

Таким образом, заявляемое устройство промышленно реализуемо, имеет новизну и существенный положительный эффект.

Источники информации

1. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филипов. - Л.: Энергоатомиздат, 1990, С. 12-13, рис. 1.4, а.
2. Новожилов О.П. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров. - 2-е изд. - М.: Изд. Юрайт, 2013. - 653 с.
3. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. - М.: Изд. дом «Додека - XXI», 2005. 384 с.
4. Устройства генерирования и формирования радиосигналов: учебник для вузов / Л.А. Белов, М.В. Богачев, М.В. Благовещенский и др.; под. ред. Г.М. Уткина, В.Н. Кулешова и М.В. Благовещенского. - М.: Радио и связь, 1994, с. 319-320, рис. 18.17.