

УДК 621.314.12

## **Обеспечение симметричного перемагничивания двухтактных преобразователей с управлением в режиме Voltage mode**

Д.Р. Манбеков, Д.А. Шевцов

### **Аннотация**

В статье показана возможность применения управления мостовым преобразователем по вольт-секундному интегралу (ВСИ). Для обеспечения симметричного перемагничивания сердечника авторами предлагается использовать спец. блок – формирователь ВСИ. Рассмотрены схемы, как с гальванической, так и без гальванической развязки входа и выхода с описанием их сильных и слабых сторон.

### **Ключевые слова**

Преобразователь, двухтактный, перемагничивание, симметричный, сердечник, Voltage mode.

Одним из важнейших требований при проектировании современных источников вторичного электропитания (ИВЭП), применяемых как в военной техники, так и на гражданском рынке, является их миниатюризация. Для достижения этой цели помимо повышения частоты преобразования и использования современной элементной базы целесообразно применять двухтактные преобразователи напряжения вместо однотактных, что особо актуально для преобразователей повышенной и большой мощности. Однако при этом, с большой долей вероятности, возникает необходимость симметрирования процесса перемагничивания сердечника двухтактного трансформатора. В противном случае возможно возникновение режима несимметричного перемагничивания, что может привести к магнитному насыщению сердечника, и, как результат, к следующим нежелательным последствиям:

- возрастанию помех и ухудшению электромагнитной совместимости;
- увеличению потерь и, следовательно, к снижению КПД;

- ненормированным броскам тока и, как следствие, к уменьшению надежности.

Для предотвращения одностороннего магнитного насыщения используются симметрирующие контуры.

Причины появления режима несимметричного перемагничивания могут быть самые разные, однако все их можно свести к эквивалентной неодинаковости длительностей смежных управляющих импульсов [1]. Особенно остро проблема несимметрии проявляется при повышенном напряжении питания и повышенных частотах преобразования. Следует отметить, что несимметрия может возникнуть при различных способах управления:

- управление по напряжению (Voltage mode);
- управление по току (Current mode);
- управление по вольт-секундному интегралу (Constant Volt-second clamp).

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, однако ни один из них не может обеспечить симметричного режима перемагничивания без применения специальных симметрирующих узлов.

Как показал проведенный анализ [2], известные методы симметрирования [3] по разным причинам оказались мало эффективными.

В данной статье рассмотрена возможность обеспечения симметричного режима перемагничивания для ШИМ-регулируемого. Для этого предлагается использовать информацию о вольт-секундном интеграле (ВСИ) на первичной обмотке силового трансформатора для обеспечения равенства изменения индукции в сердечнике в смежных полупериодах [1].

Непосредственное измерение индукции крайне затруднительно, поэтому необходимо наличие специального функционального блока – формирователя ВСИ, выходной параметр которого был бы прямо пропорционален значению индукции в сердечнике. Это можно обеспечить используя принцип подобия, в соответствии которым различные физические величины ведут себя подобно, если описываются подобными дифференциальными уравнениями. В соответствии с этим принципом, выходным параметром формирователя ВСИ было выбрано напряжение на конденсаторе, которое является интегралом от протекающего через него тока. Такой выбор обусловлен тем, что индукция в сердечнике является интегралом от напряжения на первичной обмотке. Следовательно, если протекающий через конденсатор ток будет прямо пропорционален напряжению на

первичной обмотке, то напряжение на конденсаторе будет прямо пропорционально индукции в сердечнике.

Для реализации метода симметрирования с управлением по ВСИ может быть использован ШИМ-контроллер UC 1825 [4], функциональная схема которого представлена на рис.1.

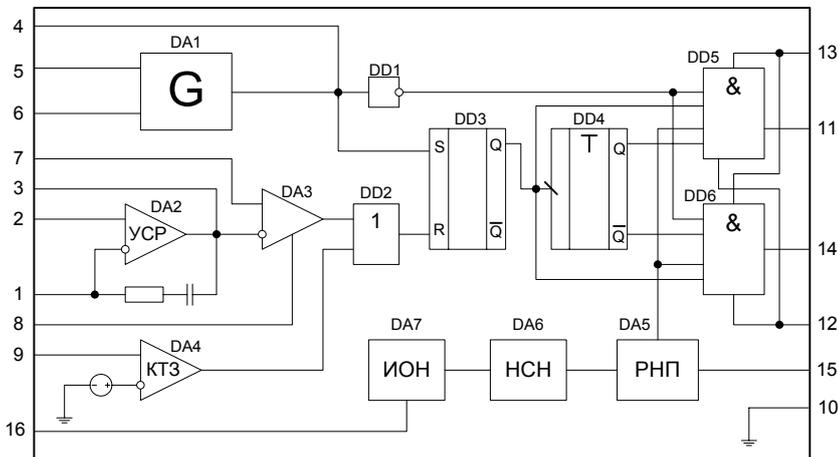


Рис.1 Функциональная схема ШИМ-контроллера UC1825.

(DA1 – генератор тактовых импульсов; DA2 – усилитель сигнала рассогласования УСРя; DA3 – компаратор ШИМ; DA4 – компаратор токовой защиты КТ3; DA5 – реле напряжения питания РНП; DA6 – непрерывный стабилизатор напряжения HCH; DA7 – источник опорного напряжения ИОН; DD3 – триггер ШИМ; DD4 – T-триггер;)

Возможный вариант схемотехнической реализации формирователя ВСИ в составе двухтактного преобразователя с управлением от ШИМ-контроллера UC 1825, представлен на рис.2.

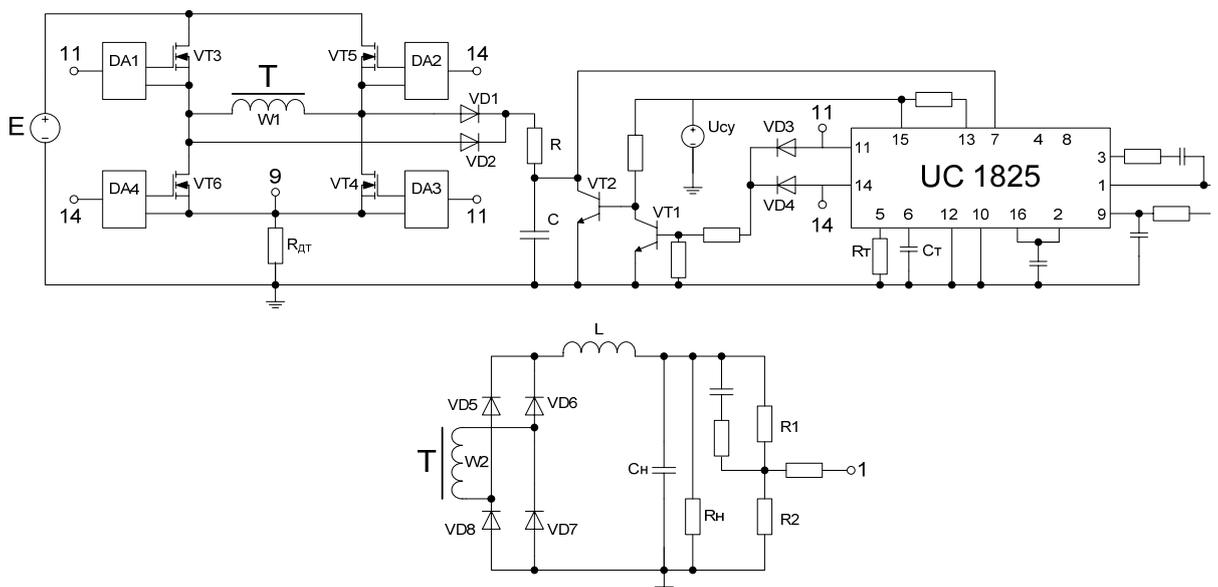


Рис.2 Схема мостового преобразователя постоянного напряжения с формирователем ВСИ и ШИМ-контроллером в первичной цепи. Гальваническая развязка между входом и выходом отсутствует.

- частота преобразования задается резистором  $R_T$  и конденсатором  $C_T$ , подключаемым соответственно к выводам 5 и 6 ШИМ-контроллера;
- выводы 11 и 14 выдают управляющие импульсы на драйверы DA1,DA3 и DA2,DA4 соответственно, которые в свою очередь управляют силовыми транзисторами VT3,VT4 и VT5,VT6;
- силовые транзисторы, в свою очередь, формируют на первичной обмотке переменное напряжение;
- со вторичной обмотки переменное напряжение поступает на выпрямитель, выполненный на диодах VD5,...,VD8 и далее через LC-фильтр поступает в нагрузку  $R_n$ ;
- напряжение с нагрузки через резистивный делитель, выполненный на резисторах R1, R2, подается на усилитель сигнала рассогласования УСР (вывод 1 ШИМ-контроллера);
- в зависимости от уровня сигнала рассогласования формируется соответствующий коэффициент заполнения ( $K_z$ ) управляющих импульсов;
- сигнал с резистивного датчика тока  $R_{дт}$ , через фильтрующую цепь на элементах R C, подается на 9 вывод, и когда уровень сигнала достигает 1 вольта узел токовой защиты отключает проводящие силовые транзисторы;
- питание ШИМ-контроллера может быть организовано различными способами (питание ШИМ-контроллера представлено эквивалентным источником  $U_{сy}$ )
- связь ДТ с ШИМ-контроллером может осуществляться как без гальванической развязки, так и с гальванической развязкой;
- связь СТК с ШИМ-контроллером осуществляется через драйверы, которые должны обеспечивать либо гальваническую развязку (УГР), либо сдвиг уровня;
- формирователь ВСИ выполнен на диодах VD1,...,4; резисторе R, конденсаторе C и транзисторах VT1,2.

Рассмотрим подробнее принцип работы формирователя ВСИ. Если пренебречь падениями напряжения ( $U_{VD}$ ) на диодах VD1,2 и напряжением ( $U_C$ ) на конденсаторе С по сравнению с напряжением на первичной обмотке ( $U_{W1}$ ), то работа формирователя ВСИ описывается следующими уравнениями и неравенствами:

$$U_{W1} \geq U_C \quad (1.1)$$

$$U_{W1} \geq U_{VD} \quad (1.2)$$

$$B = \frac{1}{WS} \int U_{W1} \cdot dt \quad (2)$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt \quad (3)$$

$$i_C = \frac{U_{3AP} - (U_{VD} + U_C)}{R}, \text{ учитывая условие (1), } i_C = \frac{U_{3AP}}{R} \quad (4)$$

$$U_C = \frac{1}{RC} \int U_{3AP} \cdot dt \quad (5)$$

Учитывая, что  $U_{3AP} = U_{W1} - U_{VT} - U_{VD} \approx U_{W1}$ , где  $U_{VT}$  – падение напряжения на открытых транзисторах VT6 или VT4, то уравнения (2) и (5) можно представить следующим образом:

$$U_C = k_1 \int U_{W1} \cdot dt$$

$$B = k_2 \int U_{W1} \cdot dt,$$

где  $k_1 = \frac{1}{RC}$ , а  $k_2 = \frac{1}{WS}$ . Поэтому обеспечив  $k_1 = k_2$  (другими словами подобрав значения R и C) напряжение на конденсаторе С будет соответствовать индукции в сердечнике.

При соблюдении выше названных условий (1-5) алгоритм работы формирователя ВСИ сводится к следующему:

- ток, прямо пропорциональный напряжению на первичной обмотке, через диоды VD1 или VD2 и резистор R заряжает конденсатор С;

- напряжение с конденсатора  $C$  подается в ШИМ-контроллер на 7 вывод и далее на компаратор, где сравнивается с опорным напряжением, поступающим с УСР;
- когда напряжение на конденсаторе достигнет опорного уровня, компаратор DA1 выдаст логическую единицу, переводящую триггер ШИМ в состояние, запрещающее выдачу управляющих импульсов с выводов 11 и 14.
- в результате этого, проводящие в данный полупериод силовые транзисторы закроются;
- при отсутствии управляющих импульсов на выводах 11 и 14 формирователь ВСИ переходит в исходное состояние, поскольку закрывается транзистор VT1 и открывается VT2, который полностью разряжает конденсатор  $C$ , тем самым подготавливая его для работы в следующем полупериоде;
- с началом следующего полупериода открывается другая пара силовых транзисторов, после чего цикл работы формирователя ВСИ повторяется.

Временные диаграммы процессов, поясняющих работу формирователя ВСИ, приведены на рис.3. Из диаграмм видно, что при повышении напряжения питания с уровня  $E_1$  до уровня  $E_2$  уменьшается время, необходимое для заряда конденсатора  $C$  до напряжения  $U_3$ , которое одинаково для обоих полупериодов. Вследствие этого уменьшается длительность управляющих импульсов  $U_{11}, U_{14}$  с времени  $t_1$  до  $t_2$ . Таким образом вольт-секундный интеграл первичной обмотки  $S1$ , соответствующий питающему напряжению  $E_1$  и длительности управляющего импульса  $t_1$ , будет равен вольт-секундному интегралу  $S2$ , соответствующему напряжению питания  $E_2$  и длительности управляющего импульса  $t_2$ .

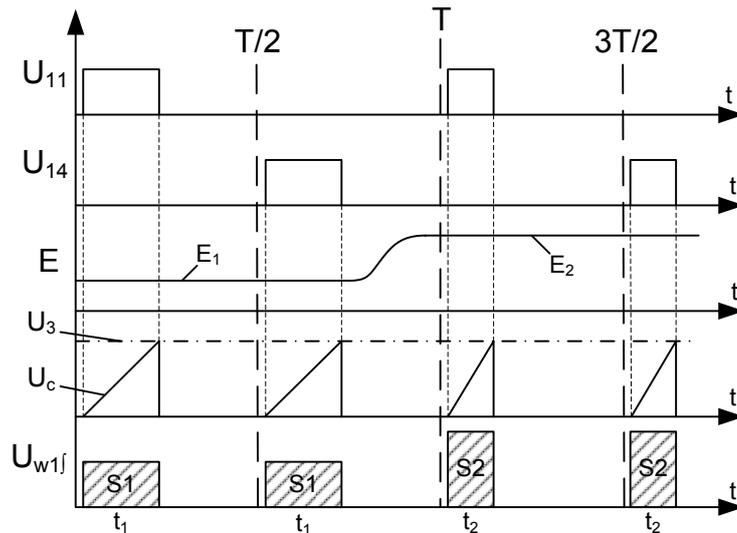


Рис.3 Временные диаграммы процессов для формирователя ВСИ

( $U_{11}, U_{14}$  – управляющие импульсы соответствующих полупериодов;  $U_3$  – опорное напряжение на компараторе ШИМ;  $E$  – напряжение питания;  $U_c$  – напряжение на конденсаторе  $C$ ;  $U_{w1f}$  – вольт-секундный интеграл на первичной обмотке)

Таким образом, предложенный принцип формирования ВСИ позволяет обеспечить равенство вольт-секундных интегралов смежных полупериодов путем коррекции длительностей смежных управляющих импульсов, независимо от дестабилизирующих факторов.

К достоинствам схемы преобразователя, представленной на рис.2, относятся:

- простота реализации предложенного алгоритма симметрирования с ШИМ-регулированием и управлением по ВСИ;
- не теряется информация о постоянной составляющей напряжения, приложенного к первичной обмотке;
- передача информации между  $R_{дт}$ , драйверами и СУ может осуществляться и без УГР;

К недостатком рассмотренной схемы можно отнести:

- отсутствие гальванической развязки между входом и выходом;

При необходимости гальванической развязки между входом и выходом можно использовать схему, показанную на рис.4. В этом случае схема управления разбивается на

две части, одна из которых (ШИМ-контроллер и формирователь ВСИ) расположена в первичной цепи, а другая часть схемы управления – датчик выходного напряжения (ДВН), источник опорного напряжения (ИОН) и УСР располагаются во вторичной цепи. При этом ИОН и УСР входят в состав микросхемы DA5 (TL 431) [5].

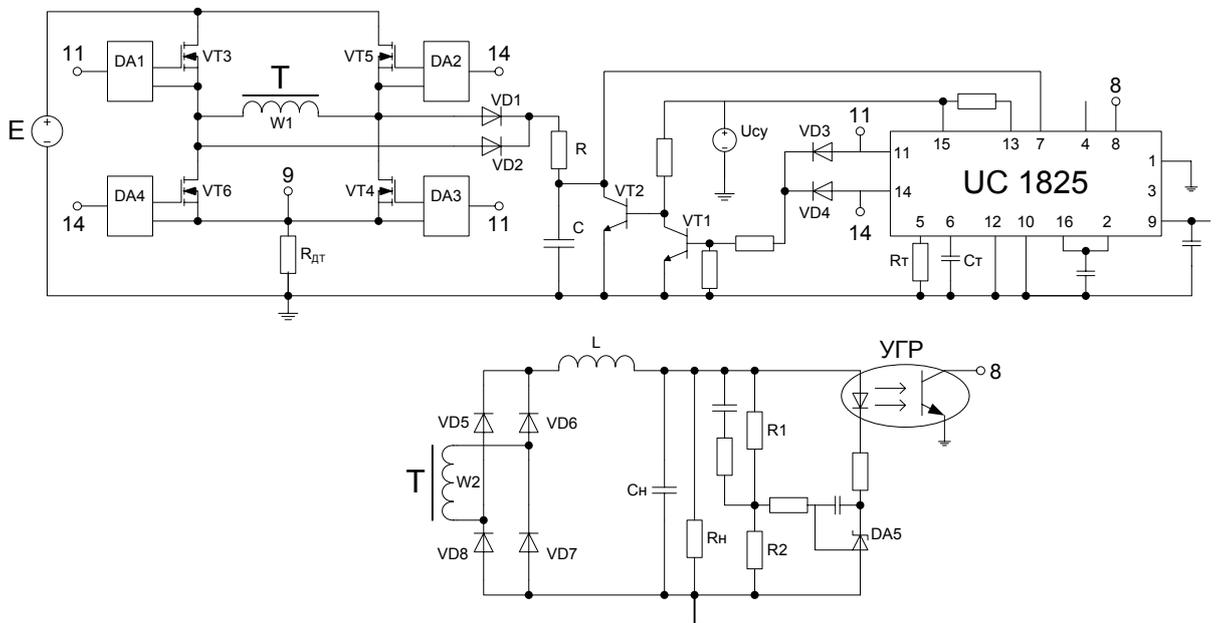


Рис.4 Схема мостового преобразователя постоянного напряжения с формирователем ВСИ и ШИМ-контроллером в первичной цепи, а также гальванической развязкой входа и выхода.

В этой схеме сигнал рассогласования с выхода УСР, выполненного на микросхеме DA5, передается в ШИМ-контроллер через УГР, выполненный на транзисторной оптопаре. Необходимо отметить, что представленная схема обладает такими же достоинствами, как и предыдущая. Несмотря на повышенную сложность, она обеспечивает гальваническую развязку между входом и выходом, что выгодно отличает ее от ранее рассмотренной.

Схема, обеспечивающая гальваническую развязку входа и выхода, с ШИМ-контроллером во вторичной цепи, показана на рис.5. При этом связь ДТ и драйверов силовых транзисторов с ШИМ-контроллером должна осуществляться только через УГР. В частности для передачи информации о токе первичной цепи в ШИМ-контроллер может быть использован трансформатор тока (на рис.5 обозначен как T2). Отметим, что УГР может быть как в составе драйверов, так и в согласующем каскаде (последний на рис.5 не показан).

В рассматриваемой схеме сигнал для формирователя ВСИ может сниматься с одной из вторичных обмоток трансформатора – либо с нагрузочной, либо со специальной измерительной. При этом принцип работы формирователя ВСИ аналогичен ранее изложенному, т.к. напряжение на вторичной обмотке, в идеале, прямо пропорционально напряжению на первичной обмотке.

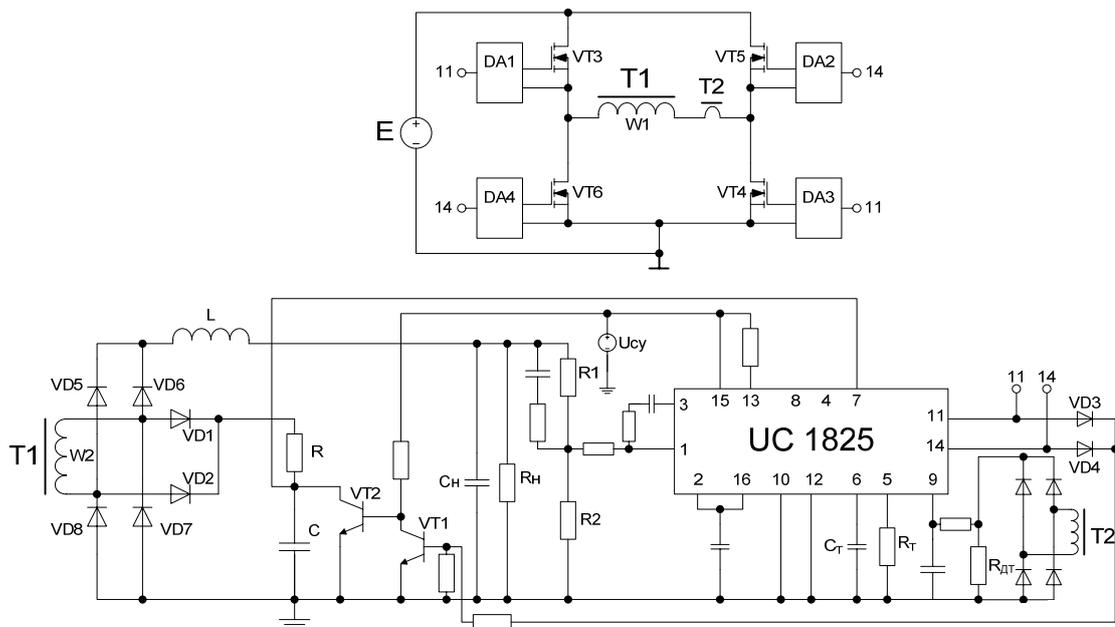


Рис.5 Схема мостового преобразователя постоянного напряжения с формирователем ВСИ и ШИМ-контроллером во вторичной цепи, а также гальванической развязкой входа и выхода.

Однако такой схеме присущи следующие недостатки:

- из-за наличия индуктивности рассеивания обмоток трансформатора информация со вторичной обмотки о вольт-секундном интеграле на первичной обмотке снимается с искажениями. При этом они тем больше, чем больше ток, протекающий по обмотке. Поэтому искажение информации, снимаемой с нагрузочной обмотки, может оказаться недопустимо большими и в ряде случаев будет целесообразно применение специальной измерительной обмотки.

- уровень напряжения на силовой вторичной обмотке может оказаться недостаточным для эффективной работы формирователя ВСИ вследствие невыполнения вышеназванных условий (1). В связи с этим также может оказаться целесообразным применение специальной дополнительной измерительной обмотки, относительно высоковольтной и малым током нагрузки.

- сигнал, снимаемый для формирователя ВСИ со вторичной обмотки (нагрузочной или дополнительной), не содержит информации о постоянной составляющей напряжения на первичной обмотке, поскольку трансформатор ее не передает.

Таким образом, мы пришли к выводу, что применение специальной дополнительной несилевой обмотки для формирователя ВСИ может оказаться целесообразным, т.к. позволит обеспечить условия, необходимые для его эффективной работы.

Однако стоит отметить, что в любом случае более эффективная работа формирователя ВСИ обеспечивается при измерении напряжения на первичной обмотке.

### **Список литературы:**

1. Шевцов Д.А., Манбеков Д.Р. Моделирование процессов несимметричного перемагничивания двухтактных ИВЭП // Практическая силовая электроника. Выпуск 30. 2008. Стр. 41-45.
2. Шевцов Д.А., Манбеков Д.Р. Сравнительный анализ различных типов транзисторных преобразователей постоянного напряжения при несимметричном режиме перемагничивания. // Практическая силовая электроника. Выпуск 33. 2009. Стр. 45-47.
3. *Шевцов Д.А., Манбеков Д.Р.* Сравнительный анализ и классификация методов симметрирования двухтактных преобразователей напряжения с ШИМ-регулированием.// Силовые транзисторные устройства. Выпуск 2./ Под редакцией Машукова Е.В. – М.: Экон-Информ, 2006. с.58-74.
4. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. – М. ДОДЭКА, 1996 г.
5. Интегральные микросхемы: Микросхемы для линейных источников питания и их применение. – М. ДОДЭКА, 1996 г.

### **Сведения об авторах**

Манбеков Дмитрий Рауфович, Московский авиационный институт (государственный технический университет), аспирант МАИ; 8(910)438-35-79; demon.84@mail.ru

Шевцов Даниил Андреевич, Московский Авиационный Институт, Профессор, д.т.н.;  
(499)158-45-59.