

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ЦИКЛОМ

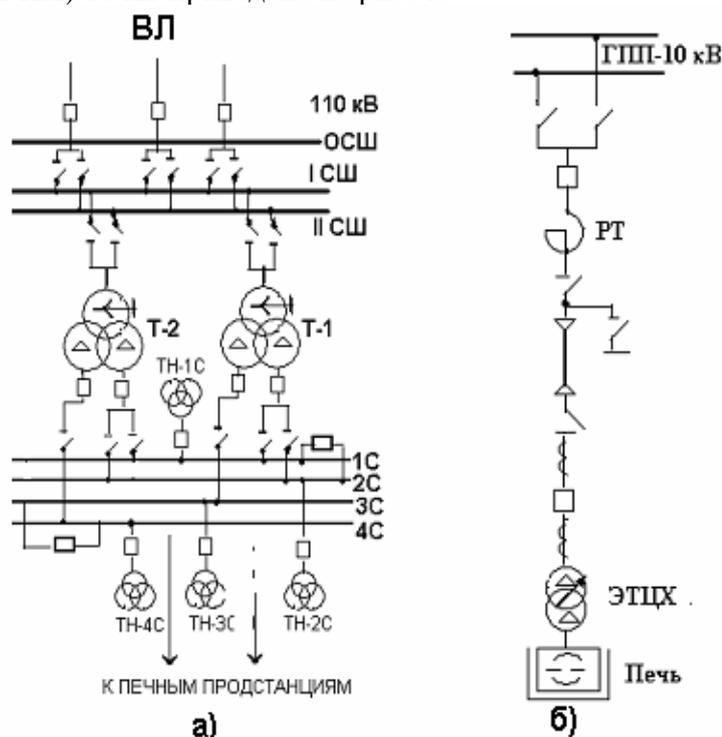
*Кадомская К.П. (Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск),  
Цивилёв И.Ю. («ПНП Болид», г. Новосибирск)*

## **Введение**

Отключение электрооборудования, обеспечивающего производство непрерывного характера, может приводить к большим экономическим потерям, так как восстановление его нормальной эксплуатации зачастую связано с серьезными ремонтными работами. К таким производствам, прежде всего, можно отнести металлургические и целлюлозно-бумажные предприятия, являющиеся также и наиболее энергоемкими предприятиями. Поэтому бесперебойное электроснабжение этих предприятий является первоочередной задачей. В статье в качестве примера рассматриваются меры повышения надежности электропитания оборудования одного из сталеплавильных заводов.

## **Схема электропитания завода и её основные характеристики**

Принципиальная схема электропитания плавильной печи от главной понижительной подстанции (ГПП) 10 кВ приведена на рис. 1.



*Рис. 1. Схема электропитания ГПП-10 кВ (а) и сталеплавильной печи (б)*

Наиболее частым технологическим нарушением электропитания являются однофазные дуговые замыкания (ОДЗ) в сети 10 кВ. Эти замыкания характеризуются неустойчивым горением дуги, т.е. её погасаниями и зажиганиями вновь, во время которых может возникнуть эскалация перенапряжений на фазах из-за повышения напряжения на изолированной нейтрали сети 10 кВ. Одна из возможных схем питания ГПП-10 кВ приведена на рис. 2.

Из этой схемы видно, что обмотки 10 кВ силовых трансформаторов 110/10 кВ соединены в треугольник. Следовательно, рассматриваемая сеть электропитания сталеплавильных печей классифицируется как сеть с изолированной нейтралью.

### *Процессы, сопровождающие однофазные дуговые замыкания в сети 10 кВ*

Расчетная схема для исследования перенапряжений, возникающих в процессе ОДЗ в сети 10 кВ, приведена на рис. 2.

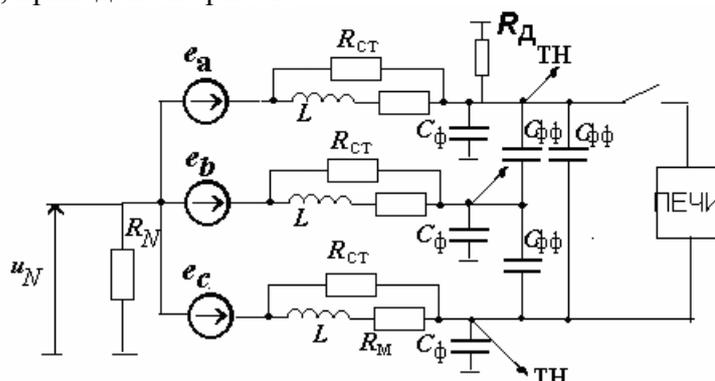


Рис. 2. Простейшая расчетная схема для исследования процессов, сопровождающих процесс ОДЗ

В данной работе нагрузка, печные подстанции, не учитывается. Соединение обмоток печного трансформатора выполнено в виде  $\Delta/\Delta$ , следовательно, токи нулевой последовательности в нагрузку не попадают. Однако руднотермические печи цехов являются нелинейной нагрузкой и могут выдавать в сеть различные гармоники, оказывая тем самым влияние на процессы при ОДЗ.

Например, на рис. 3 приведена осциллограмма изменения фазных токов ввода силового трансформатора на одном из сталеплавильных заводов, причем было зафиксировано большое количество ударных толчков тока.

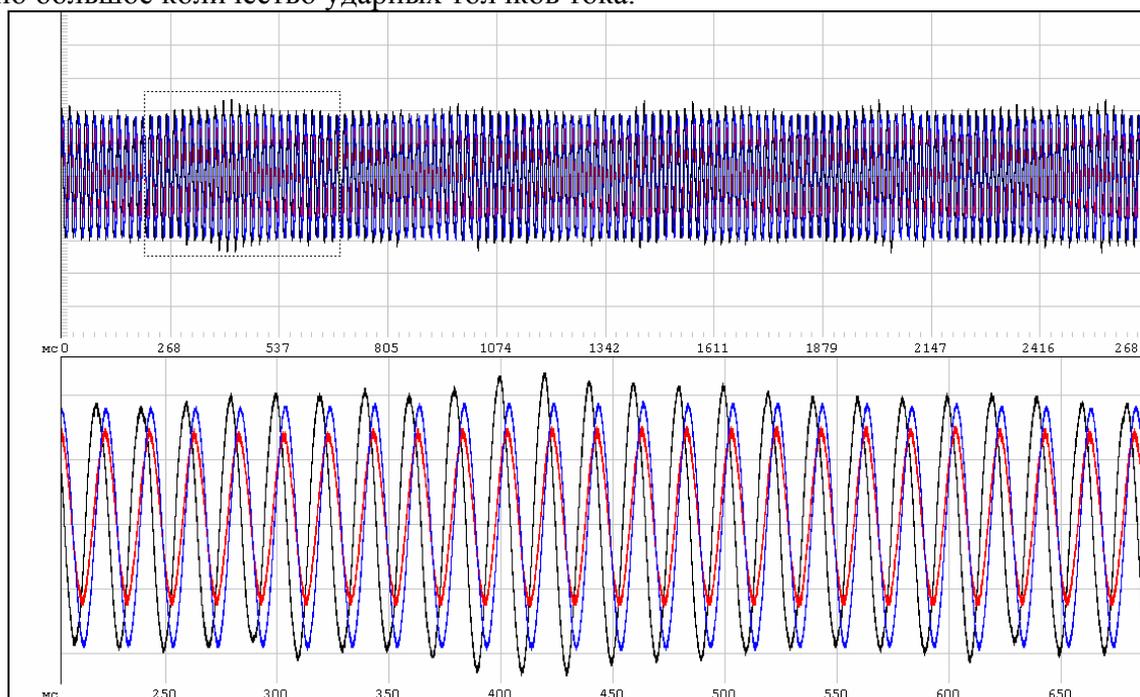


Рис. 3. Осциллограмма тока, полученная при мониторинге изменения фазных токов ввода 10 кВ силового трансформатора (фаза А, величина броска тока составила 487,5 А (амплитуда 690 А))

Также интересен, например, процесс включения ненагруженного печного трансформатора (рис. 4).

В связи с особенностями процессов, приведенных на рис. 3 и 4, целесообразно моделировать нагрузку и процессы при ОДЗ с применением вейвлет-анализа, достоинства и недостатки которого состоят в следующем:

- вейвлетные преобразования обладают практически всеми достоинствами преобразований Фурье;
- анализ Фурье применяется, если функция является периодически повторяющейся,

тогда как вейвлетные преобразования позволяют также обрабатывать осциллограммы переходных процессов;

- вейвлетные базисы, в отличие от преобразования Фурье, имеют достаточно много разнообразных базовых функций, свойства которых ориентированы на решение различных задач. Базисные вейвлеты могут иметь и конечные, и бесконечные носители, реализуемые функциями различной гладкости.
- недостатком вейвлетных преобразований является их относительная сложность.

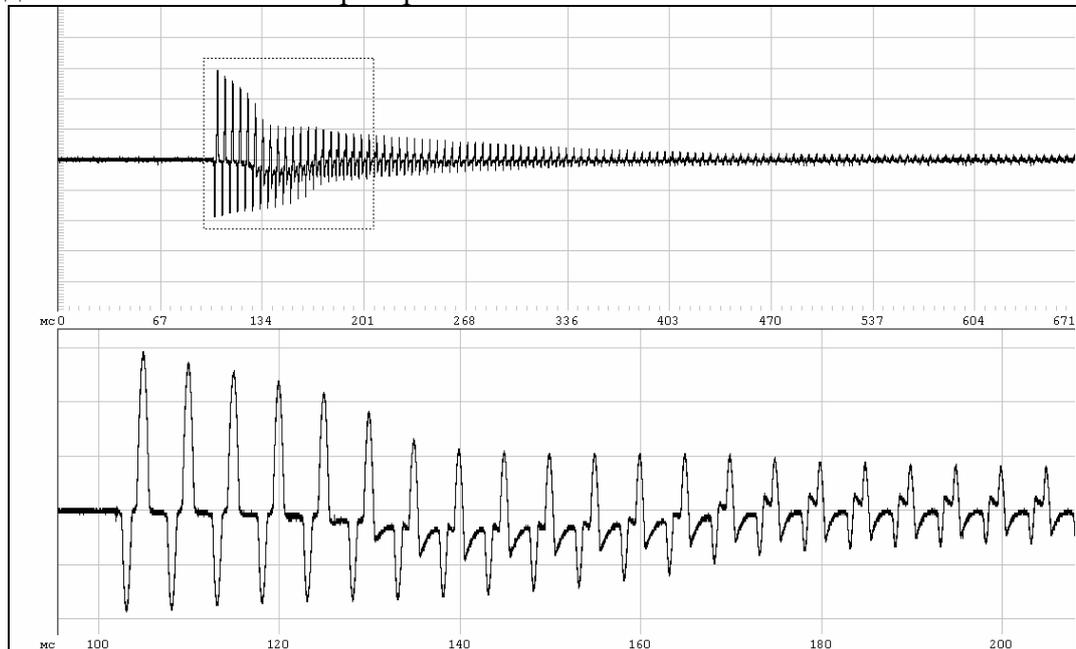


Рис. 4. Осциллограмма тока, полученная при мониторинге изменения фазных токов ввода 10 кВ силового трансформатора (фаза А)

Практическое использование вейвлет-преобразований связано, в основном, с дискретными вейвлетами как в силу повсеместного использования цифровых методов обработки данных, так и в силу ряда различий дискретного и непрерывного вейвлет-преобразований.

Непрерывные вейвлеты дают несколько более наглядное представление результатов анализа в виде поверхностей вейвлет-коэффициентов по непрерывным переменным. Однако базисы на их основе, как правило, не являются строго ортонормированными, поскольку элементы базиса бесконечно дифференцируемы и экспоненциально спадают на бесконечности. У дискретных вейвлетов эти проблемы легко снимаются, что обеспечивает более точную реконструкцию сигналов.

Однако выбор конкретного вида и типа вейвлетов во многом зависит от анализируемых сигналов и задач анализа, при этом немалую роль играет интуиция и опыт исследователя. Для получения оптимальных алгоритмов преобразования разработаны определенные критерии, но их еще нельзя считать окончательными, т.к. они являются внутренними по отношению к самим алгоритмам преобразования и, как правило, не учитывают внешних критериев, связанных с сигналами и целями их преобразований. Отсюда следует, что при практическом использовании вейвлетов необходимо уделять достаточное внимание проверке их работоспособности и эффективности для поставленных целей по сравнению с известными методами обработки и анализа [1].

Как сказано выше, в данной работе нагрузка в расчетах не учитывается.

Анализ величин токов однофазного замыкания на землю в рассматриваемой сети показывает, что эти токи не превышают 5 А. В данных условиях возможно неустойчивое горение дуги, сопровождающееся высокими уровнями коммутационных перенапряжений на «здоровых» фазах при повторных зажиганиях дуги на аварийной фазе. При этом могут возникнуть множественные повреждения, приводящие к двухфазным коротким замыканиям (КЗ) на землю, характеризующимся большими значениями токов

короткого замыкания и отключением либо секции ГПП, либо при осуществлении селективной релейной защиты отключением поврежденного фидера, питающего сталеплавильную печь. Это приводит к весьма большим ущербам, так как ликвидация технологического нарушения рассматриваемого непрерывного производства требует значительного времени. Следовательно, первоочередной является задача предотвратить развитие аварии при ОДЗ, т.е. практически исключить возможность возникновения перенапряжений в процессе ОДЗ на «здоровых» фазах.

Осуществить это требование можно, применив резистивное заземление нейтрали сети. Эскалации перенапряжений и множественных повреждений в этом случае наблюдаться не будет. Кроме того, такая мера позволит перед отключением поврежденного фидера селективно определить поврежденный фидер и перевести сталеплавильную печь на резервное питание.

Необходимо отметить, что обмотка силового трансформатора со стороны низкого напряжения соединена в треугольник. Следовательно, для подключения резистора в нейтраль сети 10 кВ требуется дополнительное нейтралеобразующее устройство, например, фильтр нулевой последовательности типа ФМЗО [2], конструкция магнитопровода которого обеспечивает весьма малую индуктивность нулевой последовательности, т.е. практическое безындуктивное подключение резистора в нейтраль сети 10 кВ.

На процессы, сопровождающие ОДЗ, существенное влияние оказывают все связи фаз сети с землей. При соблюдении условий возникновения и существования феррорезонансных явлений в контурах нелинейная индуктивность трансформатора напряжения, подключенного к шинам ГПП-10 кВ, — емкость сети 10 кВ могут возникнуть субгармонические колебания, приводящие к сверхтокам в обмотках ВН ТН, что может нарушить их тепловую стойкость и привести к возгоранию. Следовательно, необходим учет ТН при исследовании процессов, сопровождающих ОДЗ.

В этой схеме кабельная сеть моделировалась в виде сосредоточенных емкостей на землю и между фазами. Рассматривались ТН типа НТМИ и антирезонансные ТН типа НАМИ [3]. Дуга моделировалась в соответствии с гипотезой Петерсена.

#### **Результаты исследований процесса, сопровождающего**

На рис. 5 приведены компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в сети с номинальным напряжением 10 кВ, эксплуатируемой с изолированной нейтралью, при установке на шинах ГПП одного ТН типа НТМИ.

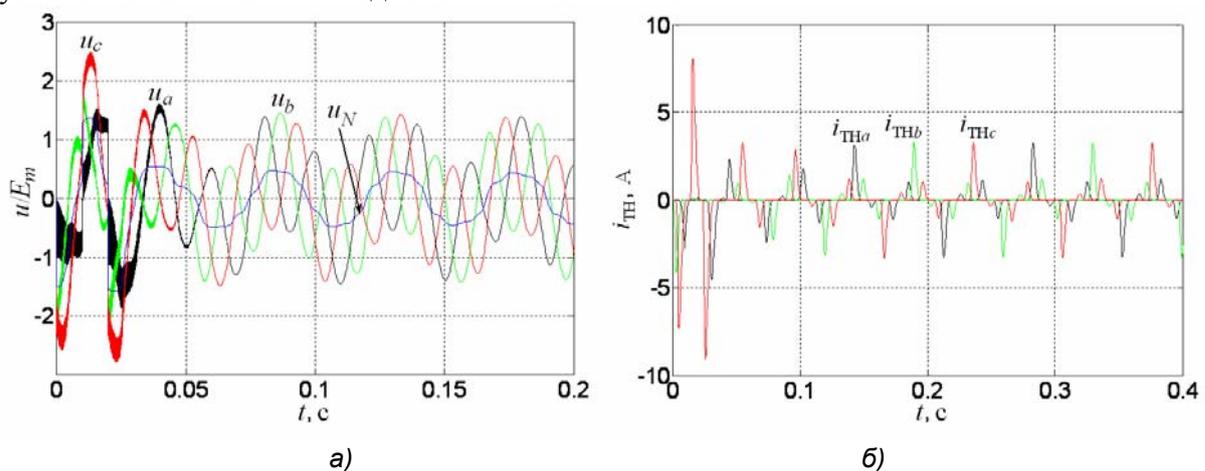


Рис. 5. Напряжения на фазах при ОДЗ (три зажигания дуги) (а) и ток в обмотке ВН ТН типа НТМИ (б)

Из рис. 5 видно, что в схеме выполнены условия существования опасного феррорезонанса, что приведет к технологическому нарушению, связанному с возгоранием ТН и последующим отключением секции ГПП.

Исключить феррорезонанс можно, включив в рассечку треугольника обмотки ТН резистор, однако эта мера не всегда помогает. Кроме того, в некоторых случаях прихо-

дится принимать относительно малые значения сопротивления резистора, что в нормальном режиме при наличии несимметрии в сети может привести к его перегреву.

На рис. 6 приведены компьютерные осциллограммы при ОДЗ при установке антирезонансного ТН типа НАМИ на ГПП-10 кВ.

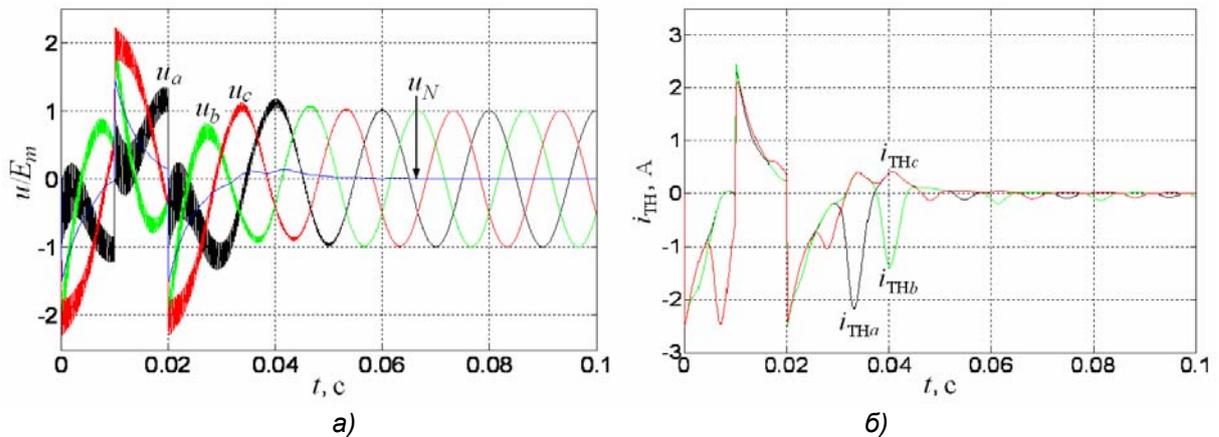


Рис. 6. Напряжения на фазах при ОДЗ (три зажигания дуги) (а) и ток в обмотке ВН ТН типа НАМИ (б)

Из рис. 6 следует, что при установке на шинах 10 кВ ТН типа НАМИ феррорезонансные явления не наблюдаются, и процессы при ОДЗ не приводят к повреждению изоляции электрооборудования.

Однако повышение надежности электропитания сталеплавильных печей может быть достигнуто с помощью отключения поврежденного фидера питания печи при условии предварительного перевода питания этой печи от другого фидера. Такие условия эксплуатации могут быть осуществлены с помощью резистивного заземления нейтрали сети. Заземление нейтрали сети через резистор позволяет избежать перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и опасных феррорезонансных явлений при ОДЗ, организовать селективную токовую релейную защиту при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ).

Необходимо, однако, помнить, что при резистивном заземлении нейтрали увеличивается ток замыкания на землю в поврежденном фидере.

Процессы при ОДЗ в случае оснащения нейтрали резистором приведены на рис. 7

$$(R_N \leq \frac{1}{900C_\phi} = 1 \text{ кОм}).$$

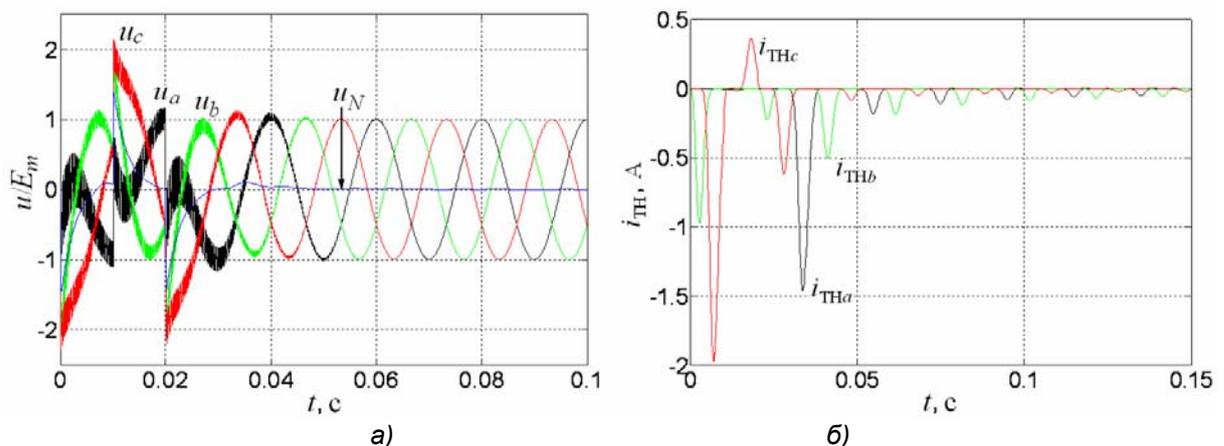


Рис. 7. Процессы, сопровождающие ОДЗ при установке в нейтрали резистора, а — напряжения на фазах, б — токи в обмотке ВН ТН типа ТНМИ

Из приведенных компьютерных осциллограмм видно, что уровень перенапряжений при трех повторных зажиганиях дуги не превосходит  $2 U_{\phi m}$ , условия же существования опасного феррорезонанса не выполнены. При этом, поскольку полный ток однофазного замыкания на землю, содержащий активную составляющую, примерно по ве-

личине равную емкостному току, протекает лишь по поврежденному фидеру, можно осуществить установку на всех фидерах токовых защит с целью селективного распознавания присоединения. Это позволяет перед отключением поврежденного фидера перевести питание соответствующей печи на другой фидер, а затем уже отключить поврежденный. При этом технологическое нарушение, заключающееся в ОДЗ или ОЗЗ на одном из фидеров, не приведет к необходимости останова печи, т.е. нарушения непрерывного технологического процесса.

#### ***Заключение***

Произведенный анализ позволяет рекомендовать в качестве меры существенного повышения надежности эксплуатации сталеплавильных печей на металлургическом предприятии резистивное заземление нейтрали сети 10 кВ.

Применение этой меры позволит:

- ограничить перенапряжения, воздействующие на изоляцию электрооборудования и тем самым продлить срок его службы;
- исключить феррорезонансные явления, обусловленные насыщением магнитопроводов ТН электромагнитного типа;
- обеспечить чувствительную и селективную релейную защиту, позволяющую распознавать поврежденный фидер и переводить печь на резервное питание без прерыва технологического процесса.

Однако при дальнейших расчетах следует учесть влияние нагрузки на процессы и оценить эффективность внедрения резистивное заземления уже с учетом изменений в моделировании процессов при ОДЗ.

#### ***Литература***

1. **Дьяконов В., Абраменкова И.** *MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник.* — СПб.: Питер, 2002, 608 с.
2. **Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А.** *Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них.*-Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2004.-368 с. — (Серия «Учебники НГТУ»)
3. **Зихерман М.Х.** Антирезонансные трансформаторы напряжения. Достижения и перспективы. — Новости электротехники. — 2007.— №2 (44). — с. 215.