

УДК 621.316.925

М.Д. Обалин<sup>1</sup>, П.А. Колобанов<sup>2</sup>

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

<sup>1</sup> Филиал АО «СО ЕЭС» – Нижегородское РДУ<sup>2</sup> ООО «ЭТС-Проект»

Причины нарушения нормальных режимов работы электротехнических систем, в большинстве случаев, связаны с повреждениями их составляющих, в частности, линий электропередачи. Для минимизации ущерба от нарушения электропитания необходимо быстро и точно определять места повреждения линий. В статье предложены принципы повышения точности одностороннего определения места повреждения (ОМП) в электрических сетях путем устранения методической погрешности расчета. Методическая погрешность ОМП характерна для сетевых районов со сложной конфигурацией и связана с трудностями получения точных аналитических формул. В работе приведена методика построения с помощью имитационной модели интеллектуального алгоритма ОМП для сети любой конфигурации. Основу формирования алгоритма составляет использование метода наложения и представления поврежденной линии как многополюсника в  $Y$ -параметрах. Особенностью алгоритма является возможность численного учета всех видов неоднородности электрической сети, что устраняет необходимость вывода отдельных аналитических выражений для каждого участка сети. При правильном вводе параметров сети ликвидируются методические погрешности, обусловленные вносимыми в расчет упрощениями. Таким образом, предложенный алгоритм ОМП способен адаптироваться к сети произвольной конфигурации.

**Ключевые слова:** интеллектуальная сеть, линии электропередачи, определение места повреждения.

### 1. Введение

Определение места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП) производится после отключения короткого замыкания (КЗ) для обеспечения ремонта поврежденного участка. Однако, любой алгоритм ОМП имеет погрешность, которая приводит к увеличению требуемой зоны обхода ЛЭП и увеличивает время, требуемое на ее ремонт. Широкое распространение получил дистанционный алгоритм с применением токов и напряжений промышленной частоты, представленный, например, в работах 2003 и 2010 гг. [1-5]. Классический дистанционный алгоритм ОМП ЛЭП [1, 2] с компенсацией влияния переходного сопротивления реализу-

ется по следующему выражению (на примере однофазного КЗ фазы  $A$ ):

$$l = \frac{\operatorname{Im}(\underline{U}_a / \underline{I}_{\text{оп}})}{\operatorname{Im}((\underline{I}_a + K \cdot 3\underline{I}_0) \cdot \underline{Z}_{1\text{уд}} / \underline{I}_{\text{оп}})}, \quad (1)$$

$$K = \frac{\underline{Z}_{0\text{уд}} - 3\underline{Z}_{1\text{уд}}}{3 \cdot \underline{Z}_{1\text{уд}}}, \quad (2)$$

где  $\underline{U}_a$ ,  $\underline{I}_a$  – фазное напряжение и ток в месте установки защиты,  $\underline{I}_{\text{оп}}$  – опорный ток, используемый для определения фазы тока в месте повреждения,  $\underline{Z}_{1\text{уд}}$ ,  $\underline{Z}_{0\text{уд}}$  – удельное сопротивление линии прямой и нулевой последовательности соответственно.

Методическая погрешность ОМП обуславливается следующими причинами:

- непостоянство удельных сопротивлений линии  $\underline{Z}_{1\text{уд}}$ ,  $\underline{Z}_{0\text{уд}}$ ;
- отпайки на линии, к которым подключены отпаечные подстанции;
- взаимоиנדукции с другими линиями, в том числе не по всей длине;
- линии, которые взаимоиנדуктируют с рассматриваемой, но их токи и напряжения в момент аварии неизвестны;
- несимметрия сопротивлений ЛЭП.

Для учета вышеуказанных факторов используется итерационный алгоритм: линия разбивается на участки с одинаковыми удельными параметрами. Напряжения и токи при переходе с участка на участок пересчитываются по закону Ома.

Наибольшую техническую сложность представляет собой алгоритм пересчета токов и напряжений с участка на участок. Простым образом его можно реализовать только для одноцепной линии без взаимоиנדукций с другими. Для произвольной сети он может быть очень сложным, и на практике в него часто вводят технические упрощения, приводящие к методической погрешности ОМП.

В статье предлагается общий алгоритм, применимый к сети любой конфигурации.

## II. Применение метода наложения

На примере однофазной сети, представленной на рис. 1, проиллюстрируем суть метода наложения [6].

Во-первых, рассчитывается доаварийный режим (рис. 1, а). Вместо предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь с ЭДС, равной доаварийному напряжению  $U_{\text{доав}F}$ . Если между точками сети, имеющими разность потенциалов  $U_{\text{доав}F}$ , включить источник ЭДС, равный  $U_{\text{доав}F}$  по величине и направлению, то токораспределение в сети не изменится.

Во-вторых, рассчитывается послеаварийный режим (рис. 1, б). В

ней ветвь КЗ представляет собой закоротку.

В-третьих, из уравнений закона Кирхгофа для послеаварийной сети вычитаются почленно уравнения доаварийной сети. Это приводит к появлению так называемой «чисто аварийной схемы» (рис. 1, в).

Чисто аварийная схема содержит только одну ЭДС, в месте КЗ. Величина ее равна доаварийному напряжению в этой точке, взятому со знаком «минус». Такой подход справедлив, если принять, что ЭДС генераторов до и после КЗ в первый момент времени одинаковы.

Отношение токов в двух любых ветвях  $\underline{KI}_{ij} = I_j / I_i$  называется коэффициентом токораспределения. В сети с одним источником ЭДС  $\underline{KI}_{ij}$  зависит только от сопротивлений сети и положения точки КЗ. Зависимость  $\underline{KI}_{ij}(l)$  в общем случае – ломаная, без единого аналитического выражения. Целесообразно получение такой зависимости с использованием имитационной модели электрической сети. Для чисто аварийных напряжений можно ввести аналогичным образом коэффициент распределения напряжения  $\underline{KU}_{ij}$ . Также допустимо использовать коэффициент отношения чисто аварийного напряжения в произвольной точке сети к чисто аварийному току линии  $\underline{KZ}_{ij}$ .

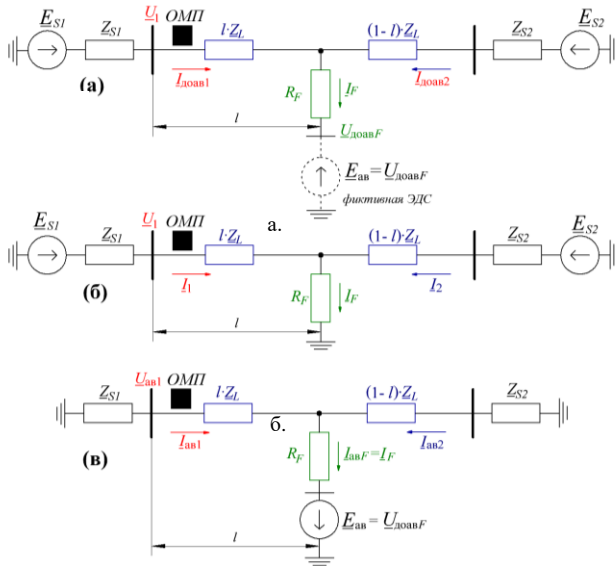


Рис. 1. Аварийная схема сети

С помощью данного подхода можно получить соотношение чисто аварийных токов и напряжений в любых двух ветвях схемы. Отметим, что чисто аварийные токи много больше доаварийных, поэтому данный подход позволяет оценить токи, в том числе, и в неконтролируемых контурах.

### III. Обучение алгоритма ОМП на имитационных моделях сети

Для работы универсального алгоритма ОМП целесообразнее всего участок линии между точкой повреждения и местом установки защиты представить в виде многополюсника в  $Y$ -параметрах. Обучение алгоритма следует вести на имитационной модели сети. Целями экспериментов являются получение зависимостей от длины:  $Y$ -параметров сети; коэффициентов распределения чисто аварийных токов и напряжений.

На рис. 2 приведена схема замещения при одностороннем ОМП для  $n$ -проводной электрической сети. Отметим, что количество полюсов многополюсника четное.

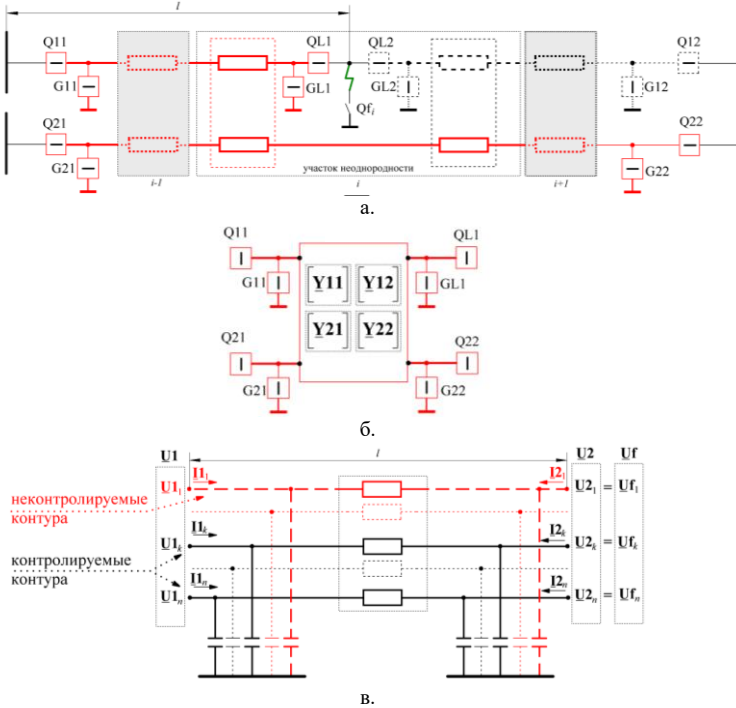


Рис. 2. Замер  $Y$ -параметров сети: линия, разбитая на участки (а); представление линии в виде многополюсника (б); модель участка сети в алгоритме ОМП (в)

Для определения  $\underline{Y}$ -параметров электрической сети наиболее простым образом, необходимо:

- заземлить все полюса, кроме одного ( $k$ -го). Тем самым все напряжения полюсов, кроме одного ( $\underline{U}_k$ ), становятся равными нулю;
- через незаземленный полюс подать питание и измерить все выходные токи  $I_1 \dots I_n$ ;
- определить коэффициенты  $k$ -го столбца по формуле

$$\underline{Y}_{ik} = \frac{I_i}{\underline{U}_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Полученные значения матрицы  $\underline{Y}$  для каждой точки защищаемой линии записываются в базу данных. При этом весь блок взаимноиндуктирующих параллельных линий делится на две половины. Каждая половина эквивалентуруется многополюсником в  $Y$ -параметрах. В ходе фиксации удельных параметров рассчитывается матрица  $\underline{Y}(l)$  одной из половин блока для каждого значения расстояния до места повреждения  $l$ .

Коэффициенты токораспределения вычисляются для каждого вида КЗ и каждого сочетания поврежденных фаз отдельно. Результаты расчетов представляют собой зависимости  $\underline{Y}(l)$ ,  $\underline{Kf}(l)$ ,  $\underline{KU}(l)$ ,  $\underline{KI}(l)$  в виде массива точек. Для работы алгоритма по фиксации удельных параметров сети производится разметка имитационной модели. Каждая линия представляет собой массив участков неоднородности, выделенных с учетом непостоянства удельных сопротивлений, наличия отпаек, участков параллельности с другими линиями и т.п.

Каждый участок неоднородности внутри разделен на две половины, и имеет выключатель  $Qf$ , имитирующий короткое замыкание. В нормальном состоянии этот выключатель отключен, т.е. КЗ отсутствует. При задании места КЗ в имитационной модели происходит определение того, на каком участке (с порядковым номером  $i$ ) находится место повреждения, и включение соответствующего  $Qf_i$ .

Перемещение точки КЗ вдоль участка производится пересчетом параметров левой и правой части участка неоднородности. При дальнейшем перемещении места замыкания отключается  $Qf_i$  и включается  $Qf_{i+1}$ . Преимущество указанного выше метода – возможность учета всех видов неоднородности сети численно, внутри имитационной модели. Это избавляет от необходимости выводить формулы пересчета аналитически для каждого участка неоднородности.

#### IV. Интеллектуальный алгоритм одностороннего ОМП

В соответствии с обозначениями на рис. 2, в, индекс 1 соответствует левой стороне многополюсника (где установлена защита), индекс 2 – точке КЗ. При коротком замыкании известными величинами являются массивы

напряжений  $\underline{U1}$  и токов  $\underline{I1}$  с одного конца многополюсника. Тогда появляется возможность вычислить параметр (обозначения в соответствии с рис. 2, в):

$$\underline{C}(l) = \underline{Y12}(l)^{-1} \cdot \underline{I1} - \underline{Y12}(l)^{-1} \cdot \underline{Y11}(l) \cdot \underline{U1} = \begin{bmatrix} \underline{C}(l)_1 \\ \dots \\ \underline{C}(l)_k \\ \dots \\ \underline{C}(l)_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Каждый элемент матрицы-столбца записывается как:

$$\underline{C}(l)_k \equiv \underbrace{\left\{ \underline{C}_k^{(1)} \quad \dots \quad \underline{C}_k^{(k)} \quad \dots \quad \underline{C}_k^{(m)} \right\}}_{m \text{ элементов}}, \quad (5)$$

соответствующей таблице длин:

$$l \equiv \underbrace{\left\{ l^{(1)} \quad \dots \quad l^{(k)} \quad \dots \quad l^{(m)} \right\}}_{m \text{ элементов}}. \quad (6)$$

Токи и напряжения в  $j$ -м неконтролируемом контуре пересчитываются через коэффициенты распределения  $\underline{KU}(l)_j$ ,  $\underline{KI}(l)_j$  с использованием токов и напряжений в  $k$ -м контролируемом контуре. Указанные коэффициенты также зависят от длины. Для контролируемых контуров все коэффициенты принимаются равными единице.

$$\underline{KU}(l)_j \equiv \left\{ \underline{KU}_j^{(1)} \quad \dots \quad \underline{KU}_j^{(k)} \quad \dots \quad \underline{KU}_j^{(m)} \right\}; \quad (7)$$

$$\underline{KI}(l)_j \equiv \left\{ \underline{KI}_j^{(1)} \quad \dots \quad \underline{KI}_j^{(k)} \quad \dots \quad \underline{KI}_j^{(m)} \right\}; \quad (8)$$

$$\underline{K}_T(l) \equiv \frac{\underline{I}f(l)}{\underline{I}_{\text{оп}}^{\text{аб}}(l)} \equiv \left\{ \underline{K}_T^{(1)} \quad \dots \quad \underline{K}_T^{(k)} \quad \dots \quad \underline{K}_T^{(m)} \right\}; \quad (9)$$

$$\underline{U}(l)_j \equiv \underline{U}_j^{\text{аб}} + \underline{U}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KU}(l)_j \cdot \underline{U}_k + \underline{U}_j^{\text{доав}}; \quad (10)$$

$$\underline{I}(l)_j \equiv \underline{I}_j^{\text{аб}} + \underline{I}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KI}(l)_j \cdot \underline{I}_k + \underline{I}_j^{\text{доав}}. \quad (11)$$

Доаварийный ток и напряжение  $\underline{U}^{\text{доав}}$ ,  $\underline{I}^{\text{доав}}$  приближенно задаются заблаговременно перед расчетом. Допустимо принять  $\underline{I}^{\text{доав}} = 0$ ,  $\underline{U}^{\text{доав}} = 0$  для заземленной по концам параллельной линии,  $\underline{U}^{\text{доав}} = U_{\text{ном}}$  для прочих случаев.

Для определения места повреждения рассчитывается параметр (рис. 3, 4, табл. 1):

$$H(l) \equiv \left\{ \operatorname{Im} \left( \frac{C^{(1)}}{K_T^{(1)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \dots \operatorname{Im} \left( \frac{C^{(k)}}{K_T^{(k)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \dots \operatorname{Im} \left( \frac{C^{(m)}}{K_T^{(m)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \right\}, \quad (12)$$

Определение места повреждения сводится к поиску такого расстояния  $l$ , для которого  $H(l) = 0$  (рис. 3).

Данный поиск производится численно.

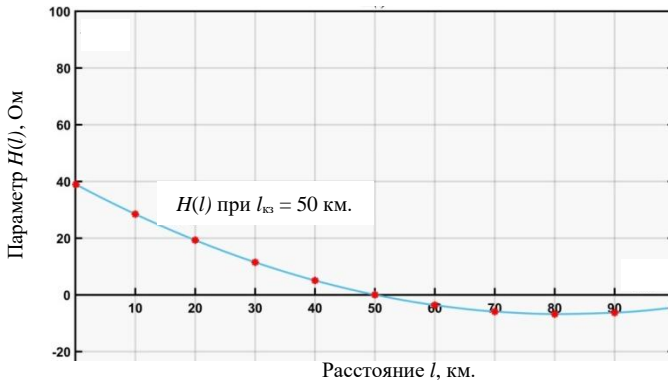


Рис. 3. Зависимость параметра  $H(l)$  от расстояния до места повреждения

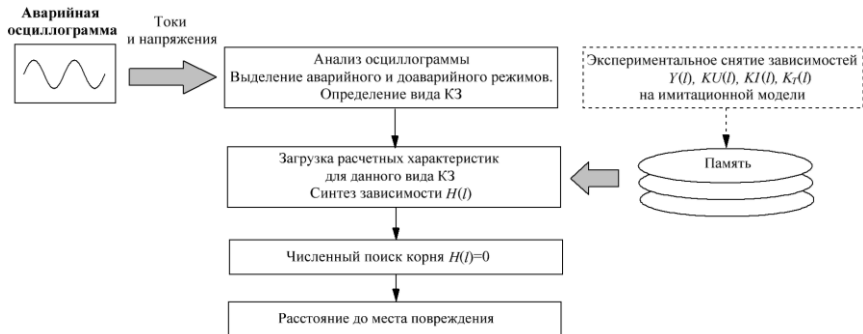


Рис. 4. Блок-схема интеллектуального алгоритма ОМП

Указанный алгоритм при правильном вводе параметров сети ликвидирует все методические погрешности, обусловленные вносимыми в расчет упрощениями. Дальнейшее повышение точности ОМП возможно путем более точного учета параметров участка сети, а также применением статистических алгоритмов [7, 8].

Таблица 1  
 Расчетные соотношения для однофазных и межфазных КЗ

Однофазное КЗ $i$ -й фазы	КЗ между фазами $i$ и $j$ (двухфазное, трехфазное, двухфазное на землю)
$\underline{C} = \underline{C}_i; \quad \underline{I}_{\text{оп}} = I_i^{\text{аб}}; \quad \underline{K}_T = \frac{I_i^{\text{аб}}}{I_{f_i}}$	$\underline{C} = \underline{C}_i - \underline{C}_j; \quad \underline{I}_{\text{оп}} = I_i^{\text{аб}} - I_j^{\text{аб}}; \quad \underline{K}_T = \frac{I_i^{\text{аб}} - I_j^{\text{аб}}}{I_{f_i} - I_{f_j}}$

### В. Выводы

1) Разработан интеллектуальный алгоритм одностороннего ОМП, способный адаптироваться к сети произвольной конфигурации. Основу формирования алгоритма составляет использование метода наложения и представления поврежденной линии как многополюсника в  $Y$ -параметрах.

2) Результаты имитационного моделирования показали, что методическая погрешность алгоритма ОМП составляет доли и единицы процентов от длины ЛЭП. При использовании алгоритма ОМП требуется внесение в память устройства параметров схемы замещения электрической сети.

© Обалин М.Д., 2018  
 © Колобанов П.А., 2018

### Библиографический список

- [1] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [2] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: Учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001.
- [3] Лямец Ю.Я., Климатова И.С. Алгоритмическое моделирование в задаче определения места повреждения в линиях электропередачи // Вестник Чувашского университета. 2007. №2. С. 147-152.
- [4] Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag London, 2010. – 425 с.
- [5] Устинов А.А., Висящев А.Н. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи // Вестник ИрГТУ. 2010. №5(45). С.260-265.
- [6] Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
- [7] Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов // Энергетик. 2012. №1. С. 7-9.
- [8] Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. №5. С. 57-62.



P.A. Kolobanov <sup>1</sup>, M.D. Obalin <sup>2</sup>

## INTELLECTUAL SINGLE-ENDED ALGORITHM OF FAULT LOCATION ON POWER TRANSMISSION LINE

<sup>1</sup> ETS – Project Ltd

<sup>2</sup> The branch of JSC «System Operator of United Power System»  
Nizhny Novgorod Regional Dispatching Office

**Abstract.** The reasons for the violation of electrical systems normal operation, in most cases, are related to damage to their components, in particular, power transmission lines. To minimize damage from power failure, it is necessary to quickly and accurately determine the fault location of the lines (FLL). In the article a problem of increasing accuracy level for single-ended fault location in electrical networks by elimination of methodological error was studied. The FLL methodological error is typical for regions with a complex configuration and is associated with difficulties in obtaining precise analytical formulas. In this paper described intelligent fault location algorithm with learning on imitation model that can be applied for any network topology. The basis of the algorithm is the use of the method of superposition and representation of a damaged line as a multiterminal network in the Y parameters. A feature of the algorithm is the ability to numerically take into account all types of heterogeneity of the electrical network, which eliminates the need for the conclusions of individual analytical expressions for each network segment. Methodical errors caused by the simplifications introduced into the calculation are eliminated if the network parameters are correctly entered. Thus, the proposed FLL algorithm is able to adapt to any network configuration.

**Keywords:** fault location, power transmission line, smart grid.

### References

- [1] E.A. Arzhannikov, V.U. Lukoyanov and M. Sh. Misrihanov. Fault location on high-voltage power transmission line. Moscow: Energoatomizdat, 2003.
- [2] A.N. Visyashev. Devices and methods of fault location on power transmission lines: Tutorial. In 2 parts. P. 1. Irkutsk: ISTU, 2001.
- [3] Y.Ya. Liaymets and I.S. Klimatova. Algorhythmical modelling in task of fault location on power transmission line // Vestnik Chuvashskogo Universiteta, no. 2, pp. 147–152, 2007.
- [4] M.M. Saha, J. Izykowski and E. Rosolowski. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag London, 2010.
- [5] A.A. Ustinov and A.N. Visyashev. Iterative methods of fault location by one-sided parameters of fault state for overhead transmission lines // Proceedings of Irkutsk State Technical University, vol. 45, no. 5, pp. 260-265, 2010.
- [6] A.M. Fedoseev and M.A. Fedoseev, Relay protection of electrical power systems, 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1992.
- [7] A.L. Kulikov, M.D. Obalin and P.A. Kolobanov. Complex algorithms of fault location based on statistical methods // Energetik, no. 1, pp. 7-9, 2012.
- [8] A.L. Kulikov, M.D. Obalin and P.A. Kolobanov. Analysis and improving the accuracy of fault location on power transmission lines // Russian Electromechanics, no. 5, pp. 57-62, 2013.