



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка взаимной зависимости источников питания систем промышленного электроснабжения с учетом несимметричных возмущений во внешних электрических сетях

Ершов М. С., доктор техн. наук,
Анцифоров В. А., магистр техники и технологии, Комков А. Н., инж.

**Российский государственный университет нефти и газа
имени И. М. Губкина, Москва**

Предложен модифицированный метод, который позволяет получить более точные, соответствующие практике эксплуатации показатели взаимной зависимости источников питания систем промышленного электроснабжения. Наличие таких показателей дает возможность выработать более обоснованные решения по повышению устойчивой работы электротехнических систем, чувствительных к кратковременным нарушениям электроснабжения.

Ключевые слова: системы электроснабжения, взаимозависимость источников питания, симметричные и несимметричные короткие замыкания.

Вынужденные отключения электрооборудования непрерывных производств чаще всего обусловлены КЗ в электрических сетях, которые в узлах нагрузки и на вводах электроприемников проявляются в виде провалов напряжения длительностью, как правило, от одной до нескольких десятых долей секунды. Несмотря на кратковременность, такие возмущения приводят к самоотключению и/или нарушению устойчивости промышленных электротехнических систем (ЭТС) с электродвигательной нагрузкой. В системах централизованного электроснабжения с замкнутой структурой сетей глубокие провалы напряжения часто возникают одновременно на всех источниках. Поэтому источники питания систем централизованного электроснабжения потребителей, критичных к кратковременным нарушениям электроснабжения, не являются независимыми. Выбор мероприятий, направленных на повышение надежности и устойчивости работы ЭТС непрерывных производств, должен проводиться с учетом оценки взаимозависимости источников питания [1].

На стадии проектирования системы электроснабжения взаимозависимость источников принято определять на основе компьютерного моделирования трехфазных КЗ в электрических сетях внешнего электроснабжения [1 – 3]. Однако в наиболее протяженных се-

тях энергосистем напряжением 110 – 220 кВ преобладают несимметричные однофазные (около 85 %) и двухфазные (около 10 %) КЗ, на долю трехфазных приходится около 5 % случаев [4]. Как отмечено в [5], показатели взаимозависимости источников питания, определенные без учета несимметрии возмущений, оказываются завышенными по сравнению с показателями, определенными по данным эксплуатации систем промышленного электроснабжения.

В данной статье предложен модифицированный метод оценки взаимозависимости источников, заключающийся в последовательном моделировании одно-, двух- и трехфазных КЗ в выбранных узлах электрических сетей с фиксацией напряжений в основных узлах (шины РУ 10(6) кВ ГПП) системы электроснабжения объекта и последующем разложении напряжений на симметричные составляющие прямой $U^{(1)}$ и обратной $U^{(2)}$ последовательностей. Эти составляющие, определяющие устойчивость ЭТС, вычисляются с использованием линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} по формулам:

$$U^{(1)} = \left(\frac{1}{6} \left[U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 + \sqrt{3} \sqrt{4U_{AB}^2 U_{BC}^2 - (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2)^2} \right] \right)^{1/2};$$

Таблица 1

| Производство | Значения коэффициентов взаимозависимости источников питания | | | |
|--------------|---|-------------|-------------|-------------------------------|
| | $k_3^{(3)}$ | $k_3^{(2)}$ | $k_3^{(1)}$ | Результирующее значение k_3 |
| НГПП-1 | 0,38 | 0,29 | 0,17 | 0,19 |
| НГПП-2 | 0,67 | 0,34 | 0,18 | 0,22 |
| НГПП-3 | 1,00 | 0,48 | 0,24 | 0,30 |

$$U^{(2)} = \left(\frac{1}{6} \left[U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - \sqrt{3} \sqrt{4U_{AB}^2 U_{BC}^2 - (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2)^2} \right] \right)^{1/2}.$$

Согласно [6] динамическая устойчивость промышленных ЭТЭС в диапазоне наиболее вероятной длительности провалов напряжения (0,1 – 0,5 с) определяется напряжением прямой последовательности $U^{(1)}$. Нарушение динамической устойчивости возможно, если остаточное напряжение прямой последовательности $U^{(1)}$ меньше напряжения статической устойчивости $U_{c,y}$ ЭТЭС, т. е. $U^{(1)} < U_{c,y}$. Данное условие служит признаком сильных возмущений [2] и используется при выборе узлов системы внешнего электроснабжения, КЗ в которых необходимо учитывать при оценке взаимозависимости источников питания.

С учетом приведенных выше статистических данных о частоте различных видов КЗ коэффициент взаимозависимости источников питания находят по формуле

$$k_{3(i,j)} = n^{(1)} k_{3(i,j)}^{(1)} + n^{(2)} k_{3(i,j)}^{(2)} + n^{(3)} k_{3(i,j)}^{(3)},$$

где $k_{3(i,j)}^{(1)}$, $k_{3(i,j)}^{(2)}$, $k_{3(i,j)}^{(3)}$ — значения коэффициентов взаимозависимости i -го и j -го источников питания относительно одно-, двух- и трехфазных КЗ соответственно; $n^{(1)}$, $n^{(2)}$, $n^{(3)}$ — доли одно-, двух- и трехфазных КЗ от общего числа возмущений.

Численное значение коэффициентов взаимозависимости при несимметричных КЗ определяется отношением числа одновременных сильных провалов напряжения прямой последовательности к общему числу сильных провалов напряжения той же последовательности на обоих сравниваемых вводах, т. е. так же, как и для трехфазного КЗ по методикам [5].

В табл. 1 приведены результаты компьютерного моделирования взаимозависимости

двух источников питания систем электроснабжения трех нефтегазоперерабатывающих производств (НГПП). Они свидетельствуют о том, что определение показателей взаимозависимости источников только по результатам расчета трехфазных КЗ приводит к их завышению. Предложенный модифицированный метод позволяет повысить точность оценки показателей взаимозависимости источников питания систем электроснабжения с учетом частоты видов КЗ в электрических сетях.

Анализ статистической информации [5] о провалах напряжения в системах централизованного электроснабжения показал, что основной их причиной являются КЗ в сетях 110 – 220 кВ, что обусловлено большой протяженностью воздушных линий сетей данных классов напряжения, определяющих структуру системы внешнего электроснабжения. В этой связи для выбора точек моделирования КЗ в сетях внешнего электроснабжения целесообразно выделить районы существенного влияния аварий в сетях на показатели взаимозависимости источников. Наибольшая несимметрия напряжений для конкретного вида КЗ имеет место в точке аварии. Примеры диаграмм напряжений для несимметричных КЗ приведены на рис. 1. По мере удаления от места аварии диаграммы напряжений деформируются: возрастает составляющая напряжения прямой последовательности и уменьшаются другие симметричные составляющие напряжения, что видно из рис. 2. Результаты компьютерного моделирования по оценке влияния удаленности КЗ на показатели взаимозависимости источников одного из НГПП приведены в табл. 2.

Сравнивая значения приведенных показателей, можно сделать вывод, что источники питания при централизованном электроснабжении непрерывных производств, критичных к кратковременным нарушениям электроснабжения, всегда в какой-то степени взаимозависимы. Этот вывод совпадает с мнением других авторов, в частности [1]: “Если

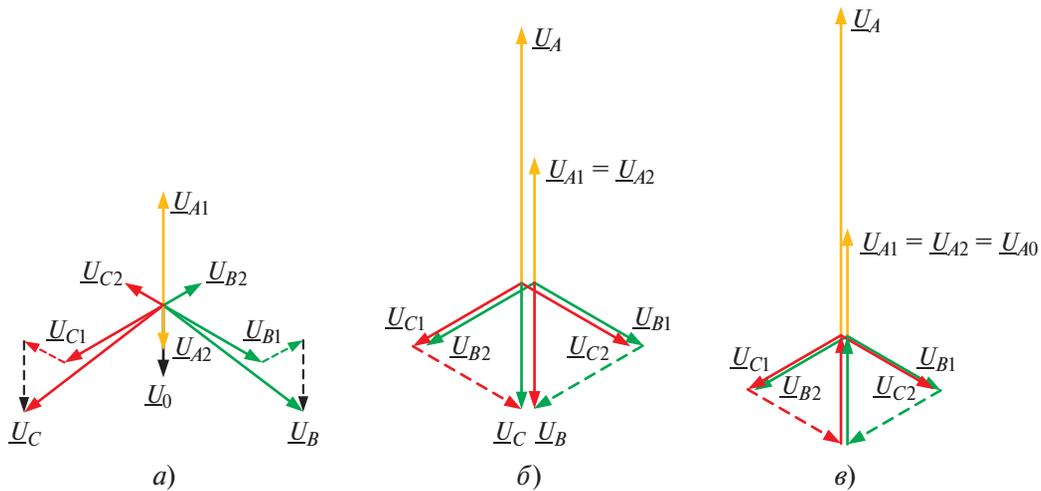


Рис. 1. Векторные диаграммы напряжений в месте несимметричных КЗ: однофазного (а), двухфазного (б), двухфазного на землю (в)

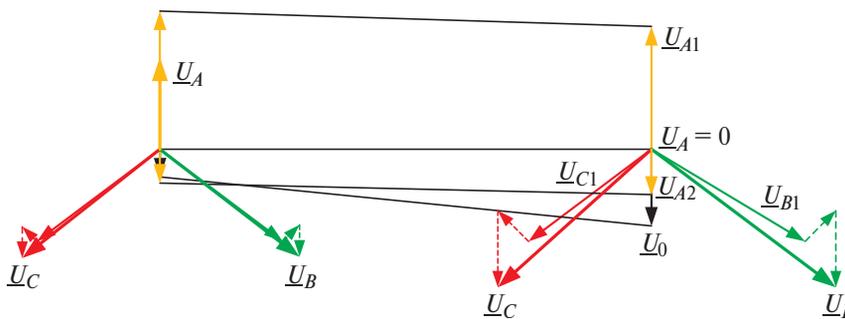


Рис. 2. Эпюры напряжений отдельных последовательностей и векторные диаграммы напряжений при однофазном КЗ

иметь в виду кратковременные нарушения электроснабжения, то нужно признать, что независимых источников питания не бывает в принципе”. Можно говорить только о приемлемом уровне зависимости. При выборе нормативных показателей взаимозависимости источников питания предлагается ориентироваться на лучшие и в то же время достижимые значения. Независимость источников питания ответственных непрерывных производств можно признать удовлетворительной, если k_3 источников находится в пределах 0,1 – 0,2. В этой связи для практических целей при расчете источников можно ограничиться моделированием КЗ в узлах, удален-

ных от ГПП производств на расстояние до 250 км. При наличии мощных генерирующих источников в электроэнергетической системе предельная удаленность точек КЗ, вызывающих глубокие провалы напряжения, может быть меньше.

На этапе эксплуатации оценку показателей взаимозависимости источников питания в системах централизованного электроснабжения можно осуществить на основании результатов обработки аварийных осциллограмм. Пример таких осциллограмм, соответствующих несимметричному КЗ в сетях системы внешнего электроснабжения, приведен на рис. 3.

Таблица 2

| Удаленность места КЗ от вводов ГПП, км | Значения коэффициентов взаимозависимости источников питания | | | |
|--|---|-------------|-------------|-------------------------------|
| | $k_3^{(3)}$ | $k_3^{(2)}$ | $k_3^{(1)}$ | Результирующее значение k_3 |
| 0 – 100 | 0,6 – 1,0 | 0,5 – 0,8 | 0,2 – 0,4 | 0,30 – 0,58 |
| 100 – 250 | 0,3 – 0,6 | 0,3 – 0,5 | 0,1 – 0,2 | 0,16 – 0,30 |
| 250 – 500 | 0 – 0,3 | 0 – 0,3 | 0 – 0,1 | 0,00 – 0,16 |

Полученные в результате измерений цифровые осциллограммы возмущений перевели в формат, совместимый со средой Excel. Последующая обработка включала в себя [7]:

вычисление мгновенных значений линейных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , расчет действующих значений линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} ;

выделение основной гармоники в кривых линейных напряжений $U_{AB(50)}$, $U_{BC(50)}$, $U_{CA(50)}$;

расчет линейных напряжений прямой и обратной последовательностей $U_{\text{л}}^{(1)}$, $U_{\text{л}}^{(2)}$;

определение коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} ;

расчет угла сдвига фаз между системами векторов линейных напряжений прямой и обратной последовательностей ψ .

Мгновенные значения линейных напряжений находят как разности соответствующих мгновенных значений фазных напряжений:

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$

$$u_{BC} = u_B - u_C;$$

$$u_{CA} = u_C - u_A.$$

Действующие значения линейных напряжений определяют как среднеквадратичные за период T синусоиды:

$$U_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{2\pi} u_i^2(t) dt}.$$

При вычислении действующих значений используются скользящие значения нижнего и верхнего пределов интегрирования. Численное интегрирование выполняется методом Симпсона по 20 интервалам за период синусоиды. Выбор числа интервалов обусловлен дискретностью оцифровки кривых мгновенных значений измеренных напряжений.

Основные гармоники напряжений определяют на основе вычисления первых членов (четного и нечетного) разложения функции в ряд Фурье:

$$a = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin x dx;$$

$$b = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos x dx.$$

Численное интегрирование для расчета коэффициентов разложения также осуществляется методом Симпсона по 20 интервалам.

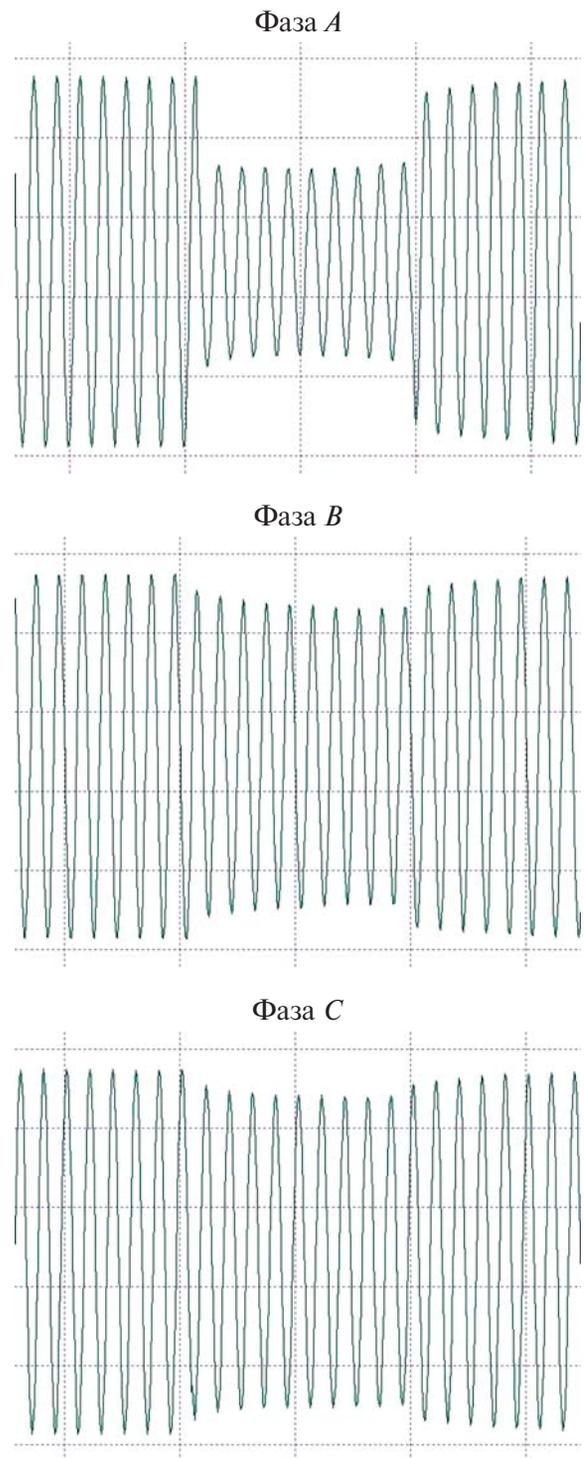


Рис. 3. Осциллограммы провалов напряжения на шинах РУ 6 кВ ГПП

Амплитуду мгновенного значения первой гармоники находят по формуле

$$U = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

По полученным значениям амплитуд определяют действующие значения первой гармоники линейных напряжений. Действующие значения напряжений прямой и обратной

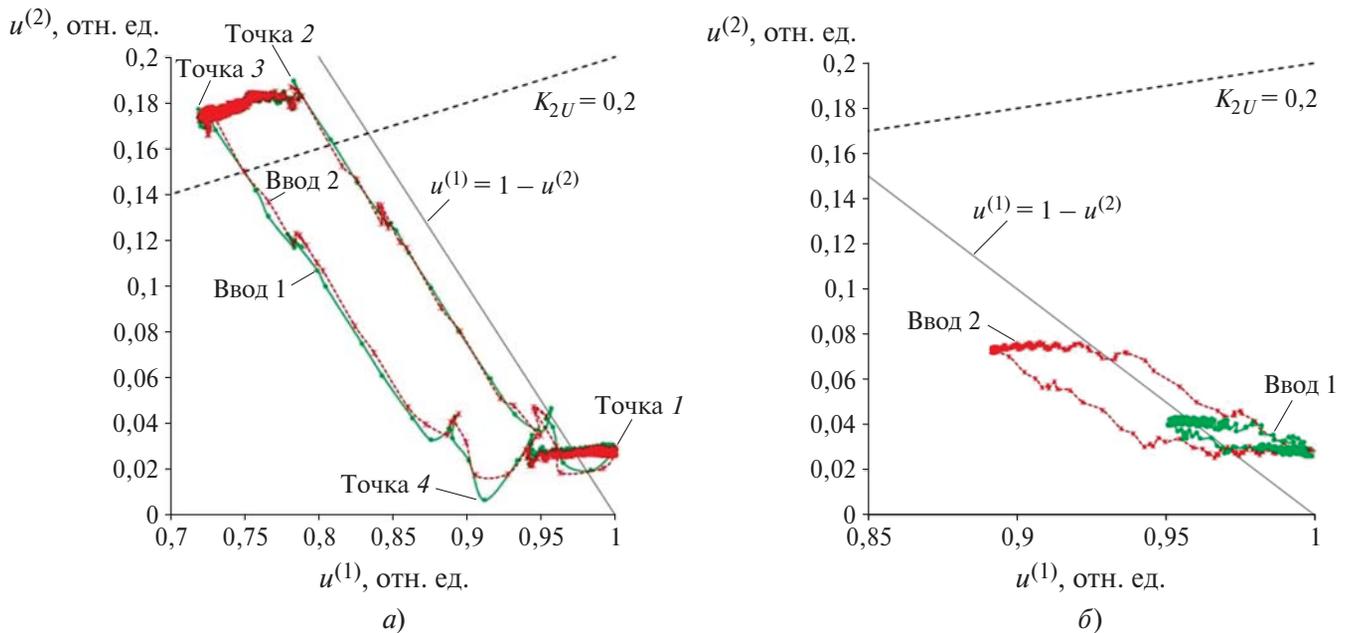


Рис. 4. Диаграмма изменения симметричных составляющих в случае провала напряжения: при высокой (а) и низкой (б) взаимозависимости вводов

последовательностей и значение коэффициента несимметрии напряжения вычисляют по приведенным в начале статьи формулам.

Угол сдвига фаз между системами векторов прямой и обратной последовательностей рассчитывают для фазы A по теореме косинусов:

$$\psi = \arccos \left(\frac{U_{AB}^2 - (U^{(1)})^2 - (U^{(2)})^2}{2U^{(1)}U^{(2)}} \right).$$

В [8] отмечено, что в процессе возмущения симметричные составляющие напряжения изменяются. Пример этого, полученный на основе обработки аварийной осциллограммы, показан на рис. 4. Приведенная здесь кривая (траектория провала) начинается с правого нижнего угла (точка 1 — $t = 0$ мс). За время около одного периода она достигает верхнего правого угла (точка 2 — $t = 21$ мс) и далее движется против часовой стрелки до левого верхнего угла (точка 3 — $t = 439$ мс), затем — до левого нижнего угла (точка 4 — $t = 469$ мс) и замыкается в правом нижнем углу (точка 1 — $t = 662$ мс). Можно предположить, что первый участок (1–2) обусловлен электромагнитными процессами в начале аварии, второй (2–3) — электромеханическими процессами торможения выбегающих приводов, третий (3–4) — электромагнитными процессами при отключении места аварии и последний (4–1) — электромеханическими процессами разгона

электроприводов. Таким образом, диаграммы изменения симметричных составляющих в процессе аварии, достаточно типичные для большинства несимметричных КЗ, характеризуют процесс развития возмущения [8].

Большая взаимозависимость вводов ЭТС обуславливает при провалах напряжения примерно одинаковые действующие значения напряжения на обоих вводах. Обратная ситуация, когда снижение напряжения на одном вводе практически не отражается на уровне напряжения на другом, характеризует малую взаимозависимость вводов. Аналогично действующим значениям составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей при большой взаимозависимости практически совпадают, а при малой — значительно отличаются. Поэтому при большой взаимозависимости вводов траектории провалов близки друг к другу (см. рис. 4, а) как по размерам, так и по форме.

В результате регистрации серии провалов напряжения на ряде предприятий нефтяной и газовой промышленности установлено, что подавляющее их большинство на вводах систем электроснабжения указанных объектов несимметричны. Для исследуемых предприятий расчет показателей взаимозависимости методами, оперирующими с трехфазными возмущениями, приведет к значительному завышению значений коэффициента взаимозависимости. Расчетные показатели взаимозависимости вводов, полученные с помощью

модифицированного метода, хорошо коррелируются с результатами обработки зафиксированных осциллограмм напряжений.

По итогам экспериментальных наблюдений установлено, что чем ближе промышленная ЭТС к крупным генерирующим мощностям, тем ниже коэффициент несимметрии во время возмущения. На рис. 4, *а* показаны траектории провалов для ЭТС, электрически удаленной от мощной электростанции на расстояние 40 км. Для ЭТС, траектории провалов которой изображены на рис. 4, *б*, удаленность от генерирующих мощностей составляет около 2 км. Таким образом, на несимметрию провалов напряжения на входе ЭТС кроме удаленности точки КЗ влияет расположение генерирующих мощностей, которые при близких расстояниях обеспечивают подпор напряжения прямой последовательности.

В заключение можно констатировать, что предложенный модифицированный метод позволяет получить более точные, соответствующие практике эксплуатации, показатели взаимозависимости источников питания систем промышленного электроснабжения. Их наличие дает возможность выработать более обоснованные решения по повышению устойчивой работы ЭТС, чувствительных к

кратковременным нарушениям электроснабжения.

Список литературы

1. Гуревич Ю. Е., Кабиков К. В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005.
2. Ершов М. С., Егоров А. В., Трифонов А. А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. — М.: ООО «Издательский дом “Недра”», 2010.
3. К вопросу о количественной оценке взаимозависимости источников внешнего электроснабжения / М. С. Ершов, А. В. Егоров, В. А. Анцифоров, А. В. Суржиков. — Промышленная энергетика, 2011, № 6.
4. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах. — М.: Мир, 2003.
5. Ершов М. С., Егоров А. В., Анцифоров В. А. Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения. — Промышленная энергетика, 2014, № 1.
6. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, Н. В. Валов, А. Н. Комков. — Промышленная энергетика, 2011, № 9.
7. Егоров А. В., Мелик-Шахназарова И. А., Суржиков А. В. Опыт повышения надежности электроснабжения высокотехнологичного производства. — Тр. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2012, № 3 (268).
8. Комков А. Н. О параметрах несимметричных возмущений в системе внешнего электроснабжения. — Донецк: ДонНТУ, 2013.

antsiforov@mail.ru