

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ МАШИН КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

С. К. ПОДНЕБЕННАЯ, В. В. БУРЛАКА, С. В. ГУЛАКОВ

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.

E-mail: office@pstu.edu

В работе изучены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости источников питания однофазных машин контактной сварки с трехфазной питающей сетью. Рассмотрены два основных направления: применение активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (АФКСУ) и разработка источников питания (ИП) с коррекцией коэффициента мощности (ККМ). Применение АФКСУ позволяет использовать существующее сварочное оборудование, однако высокая стоимость сдерживает их широкое распространение. ИП с ККМ предполагает использование преобразователей со звеном постоянного тока, либо непосредственных матричных преобразователей, поскольку основным требованием к ИП для сварочных машин является возможность формирования выходного напряжения заданной формы, амплитуды и частоты. В статье рассмотрен способ управления трехфазно-однофазным матричным преобразователем с шестью ключами, позволяющий формировать выходное напряжение прямоугольной формы частотой 50 Гц. Выбор частоты обусловлен применением сварочного трансформатора, рассчитанного на работу на частоте сети. Форма напряжения выбрана из условий обеспечения минимума потерь мощности в сети и недопустимости насыщения сварочного трансформатора. Авторами также предложено схемное решение и способ управления матричным преобразователем с пятью ключами, который позволяет при формировании выходного напряжения, синхронизированного с сетевым, получить коэффициент мощности ИП близкий к единице. Проведен анализ чувствительности предложенного источника питания к отклонению напряжений, в результате чего установлено, что при формировании прямоугольного напряжения удается добиться устойчивой работы при отклонениях напряжения порядка 10 %, в результате чего значительно повышается качество сварных соединений. Библиогр. 11, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: машина контактной сварки, источник питания, матричный преобразователь, коэффициент мощности, электромагнитная совместимость

Источники питания (ИП) машин контактной сварки являются мощными нелинейными потребителями электроэнергии. В большинстве из них применяются тиристорные схемы управления. Кроме того, являясь в основном однофазными, такие ИП, при включении их в трехфазную сеть (особенно при включении и одновременной работе нескольких ИП машин на разных фазах), оказывают на нее негативное влияние. Это выражается в росте коэффициентов несимметрии и несинусоидальности напряжения [1–4]. Ухудшение качества питающего напряжения, в свою очередь, сказывается на качестве сварки, причем наибольшую значимость имеет отклонение напряжения, которое при превышении 15 % приводит к 100 % браку (для коррозионностойких сталей к 100 % браку приводит отклонение напряжения на величину более 10 %) [5]. Таким образом, решение проблемы обеспечения электромагнитной совместимости сварочного оборудования с электрической сетью является актуальной задачей.

Решение поставленной проблемы возможно в двух направлениях — применении дополнительных активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (АФКСУ) [6], либо разработке и применении ИП с коррекцией коэф-

фициента мощности (ККМ) [4, 7, 8]. Реализация первого варианта позволяет обеспечивать требуемый (не всегда единичный) коэффициент мощности (КМ) комплекса «сварочный источник питания — АФКСУ», снижает потери мощности в электрической сети, обеспечивает симметричную загрузку трех фаз при работе однофазного источника питания в трехфазной сети. Достоинством такого подхода является сохранение существующих сварочных ИП в технологическом процессе без каких-либо изменений. Основным недостатком первого варианта является его низкая рентабельность, поскольку стоимость АФКСУ соизмерима со стоимостью самого ИП.

Другое направление решения сформулированной проблемы — совершенствование ИП — имеет перспективы в связи с развитием силовой электроники, появлением мощных и быстрых силовых ключей, позволяющих коммутировать большие нагрузки.

В работах [9, 10] рассмотрены схемные решения, направленные на совершенствование ИП путем применения тиристорных преобразователей трехфазного напряжения в однофазное, позволяющих обеспечить симметричное (или квазисимметричное) потребление токов. Главным недо-

статком этих схем является высокий коэффициент несинусоидальности потребляемых токов (до 80...90 %) и необходимость использования низкочастотного трансформатора, вызванная пониженной частотой выходного напряжения, формируемого тиристорным преобразователем.

Более эффективным на сегодняшний день является разработка транзисторных ИП, которые строятся, в основном, на базе преобразователей энергии с промежуточным звеном постоянного тока (выпрямитель, звено постоянного тока, инвертор). Подключение таких преобразователей к электрической сети осуществляется через входной трехфазный LC-фильтр, изолирующий сеть от модуляционных составляющих тока, генерируемых преобразователем.

Применение неуправляемого выпрямителя (например, шестипульсного) обеспечивает при симметричной системе сетевых напряжений потребление из сети симметричных токов [8]. Однако при наличии несимметрии сетевых напряжений, симметрия потребляемых токов также нарушается. Кроме того, спектральный состав токов, потребляемых шестипульсным выпрямителем, не позволяет обеспечить электромагнитную совместимость его с сетью без установки АФКСУ, в соответствии с нормами, устанавливаемыми ГОСТ 13109–97, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, 61000-3-4:2004.

Топологии инверторов, наиболее часто используемые для таких ИП: мостовые, полумостовые и двухтактные (push-pull), поскольку они позволяют обеспечить отсутствие постоянной составляющей магнитного потока в трансформаторе. Двухтактный и мостовой инверторы формируют на выходе преобразователя двухполярное напряжение, максимальное значение которого равно напряжению звена постоянного тока. Недостатком двухтактного инвертора является необходимость использования ключей, способных выдерживать двукратное напряжение звена постоянного тока; к недостаткам мостового инвертора относится увеличенное число силовых ключей (четыре у мостового против двух у двухтактного). Полумостовой инвертор, состоящий из двух ключей, формирует выходное напряжение, максимальное значение которого равно половине напряжения звена постоянного тока, что является его недостатком [8].

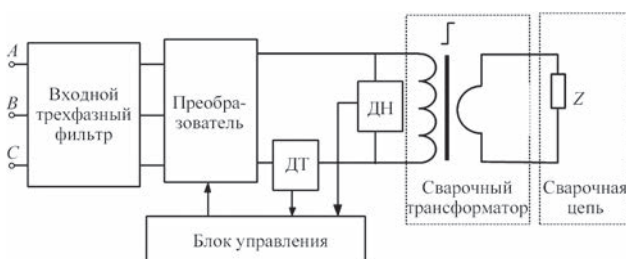


Рис. 1. Структурная схема подключения МКС к сети

Установка корректора КМ на входе преобразователя позволяет обеспечить синусоидальность потребляемых токов [7], однако несколько снижает технико-экономические показатели такого источника, в связи с увеличенным числом управляемых силовых ключей.

ИП с ККМ на базе преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока являются достаточно эффективными, однако их широкое распространение сдерживает высокая стоимость. Кроме того, существует проблема надежности емкостного накопителя энергии в звене постоянного тока, а также необходимость введения специальных схем ограничения зарядного тока конденсаторов при включении источника в сеть.

Поэтому на сегодняшний день исследования направлены, в основном, на удешевление таких ИП. Это дает возможность сформулировать цель статьи, которая заключается в разработке эффективного источника питания для машины контактной сварки, обеспечивающего высокое качество сварочного процесса и электромагнитную совместимость с сетью.

Авторами предложено рассмотреть ИП МКС, который состоит из сварочного трансформатора, преобразователя, установленного в первичную цепь трансформатора, и входного фильтра, включенного между преобразователем и сетью (рис. 1). В качестве входных сигналов для управления преобразователем выступают первичные ток и напряжение, измеряемые соответствующими датчиками (ДТ, ДН), а также напряжения сети. В качестве преобразователя ИП МКС предлагается использовать непосредственный матричный преобразователь (МП), особенностью которого является то, что промежуточное звено постоянного тока (обычно — накопительный конденсатор большой емкости) отсутствует, что значительно повышает технико-экономические показатели преобразователя.

Трехфазно-однофазный МП состоит из шести двунаправленных ключей, каждый из которых подключает одну из фаз сети непосредственно к нагрузке (рис. 2). Двунаправленные ключи могут быть выполнены в виде двух встречно-последовательно соединенных транзисторов с обратными диодами, а управляющие электроды транзисторов подключены к блоку управления (БУ).

Известно, что минимум потерь мощности в электрической сети при подключении к ней нагрузки можно получить при обеспечении пропорциональности между потребляемыми токами и соответствующими фазными напряжениями [11]. То есть МП должен имитировать симметричную активную нагрузку.

Мгновенная активная мощность трехфазной сети определяется как сумма мгновенных активных мощностей всех трех фаз:

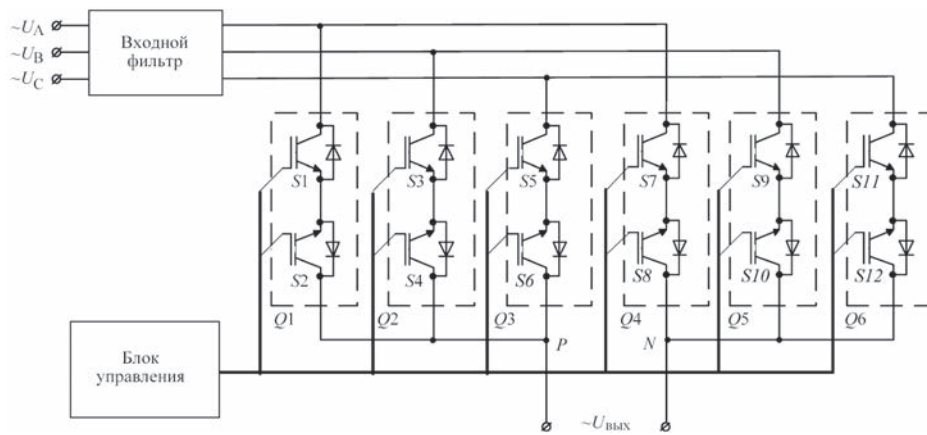


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = (u_A(t))^2/R + (u_B(t))^2/R + (u_C(t))^2/R, \quad (1)$$

где $p_A(t) = (u_A(t))^2/R$ — мгновенная мощность фазы A ; $p_B(t) = (u_B(t))^2/R$ — мгновенная мощность фазы B ; $p_C(t) = (u_C(t))^2/R$ — мгновенная мощность фазы C , R — имитируемая активная нагрузка, Ом; $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ — мгновенные фазные напряжения сети, В.

Для симметричных напряжений и нагрузки мгновенная мощность, потребляемая последней, является постоянной величиной. При этом, ввиду отсутствия накопителя энергии, сам МП потребителем активной мощности не является (за исключением потерь мощности в силовых ключах, чем пока можно пренебречь). Из этого следует, что для обеспечения симметричного потребления токов МП должен работать с постоянной активной мощностью.

$$P = U(t)I(t) = \text{const}, \quad (2)$$

где $U(t)$ — выходное напряжение МП, В; $I(t)$ — выходной ток МП, А.

Если пренебречь влиянием индуктивности сварочной цепи на выходной ток преобразователя, с допустимой погрешностью можно предположить, что симметричное потребление токов МП возможно при формировании на его выходе постоянного напряжения. При этом постоянная составляющая тока, протекающего через первичную обмотку сварочного трансформатора, приведет к его подмагничиванию и значительному росту потерь мощности.

Избежать этого можно, обеспечив изменение полярности выходного напряжения МП в соответствии с выражением:

$$\int_0^{T_{\text{ВЫХ}}} U(t)dt = 0, \quad (3)$$

где $T_{\text{ВЫХ}}$ — период выходного напряжения МП, с.

При несимметричной системе сетевых напряжений мгновенная активная мощность трехфаз-

ной сети, определяемая выражением (1), постоянной величиной не является, тогда управление преобразователем может осуществляться из условия потребления заданной активной мощности, усредненной за период сети, которая регулируется изменением имитируемого активного сопротивления R . При этом имитируемое активное сопротивление не должно меняться в течение периода сети, чтобы не создавать низкочастотных гармоник.

Рассмотрим симметричную систему напряжений, и, в соответствии с вышеуказанным допущением, осуществим формирование на выходе МП прямоугольного напряжения с частотой 50 Гц. Начальный фазовый сдвиг напряжения фазы A примем равным нулю. Условно период сети разделим на шесть секторов: первому и четвертому сектору соответствует наибольшее абсолютное значение мгновенного напряжения фазы B (первый — при отрицательном напряжении фазы B , четвертый — при положительном), второму и пятому — фазы A (второй — при положительном напряжении фазы A , пятый — при отрицательном), третьему и шестому — фазы C (третий — при отрицательном напряжении фазы C , шестой — при положительном).

Скважности управляющих импульсов ключей $Q1-Q6$ рассчитываются по следующим выражениям:

$$D_1 = \frac{u_A(t)}{R \cdot I(t)}; D_2 = -\frac{u_B(t)}{R \cdot I(t)}; D_3 = -\frac{u_C(t)}{R \cdot I(t)}; \quad (4)$$

$$D_4 = -D_1; D_5 = -D_2; D_6 = -D_3.$$

Выбор нужной пары ключей для положительной полярности выходного напряжения происходит в блоке управления в соответствии с табл. 1.

Единичная скважность в таблице означает, что в данном секторе ключ включен постоянно. Для формирования выходного напряжения отрицательной полярности сигналы управления ключами $Q1-Q3$ и $Q4-Q6$ меняются местами (табл. 2).

Формирование выходного напряжения с частотой 50 Гц позволяет добиться еще одного эф-

Таблица 1. Распределение сигналов управления ключей в зависимости от номера сектора для положительной полярности выходного напряжения

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	1	3	4	5	8
Q1	D_1	1	D_1	0	$1 - D_2 - D_3$	0
Q2	$1 - D_1 - D_3$	0	D_2	1	D_2	0
Q3	D_3	0	$1 - D_1 - D_2$	0	D_3	1
Q4	0	$1 - D_5 - D_6$	0	D_4	1	D_4
Q5	1	D_5	0	$1 - D_4 - D_6$	0	D_5
Q6	0	D_6	1	D_6	0	$1 - D_4 - D_5$

Таблица 2. Распределение сигналов управления ключей в зависимости от номера сектора для отрицательной полярности выходного напряжения

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	2	3	4	5	6
Q1	0	$1 - D_5 - D_6$	0	D_4	1	D_4
Q2	1	D_5	0	$1 - D_4 - D_6$	0	D_5
Q3	0	D_6	1	D_6	0	$1 - D_4 - D_5$
Q4	D_1	1	D_1	0	$1 - D_2 - D_3$	0
Q5	$1 - D_1 - D_3$	0	D_2	1	D_2	0
Q6	D_3	0	$1 - D_1 - D_2$	0	D_3	1

Таблица 3. Распределение сигналов управления ключей в зависимости от номера сектора для формирования выходного напряжения матричного преобразователя с пятью ключами

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	2	3	4	5	6
Q1	1	D_2	0	1	D_2	0
Q2	0	D_3	1	0	D_3	1
Q3	D_4	1	D_4	D_4	1	D_4
Q4	D_5	0	D_5	D_5	0	D_5
Q5	D_6	0	D_6	D_6	0	D_6

фекта: при синхронизации выходного напряжения с одним из сетевых (например, фазы A), можно уменьшить число силовых ключей преобразователя до пяти (рис. 3). Скважности управляющих импульсов ключей преобразователя с пятью ключами рассчитываются в соответствии с (4) и приведены в табл. 3.

Применение МП с пятью ключами позволяет сохранить все свойства и преимущества классического МП с шестью ключами, за исключением возможности изменения выходной частоты, однако ввиду преимущественного большинства сва-

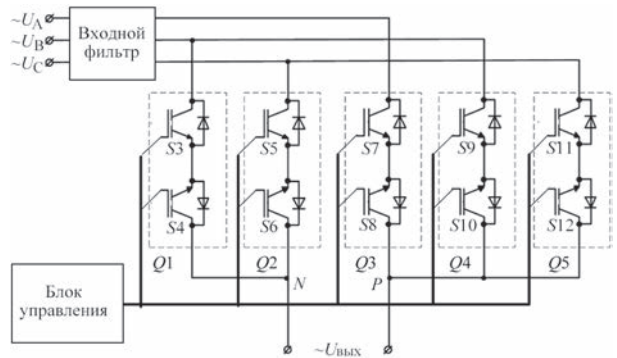


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя с пятью ключами

рочных ИП, рассчитанных на работу с трансформатором промышленной частоты, это не является недостатком.

В результате математического моделирования в пакете MathCAD получены диаграммы входных токов, выходных напряжения и тока МП с пятью ключами (рис. 4, рис. 5). Параметры МП следующие: частота переключения 3,2 кГц, заданное выходное напряжение — прямоугольное, частотой

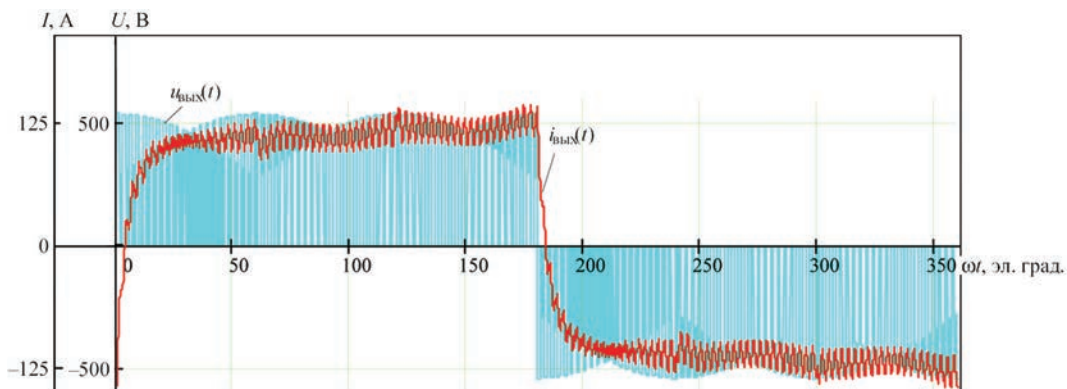


Рис. 4. Диаграммы выходных напряжения и тока МП с пятью ключами

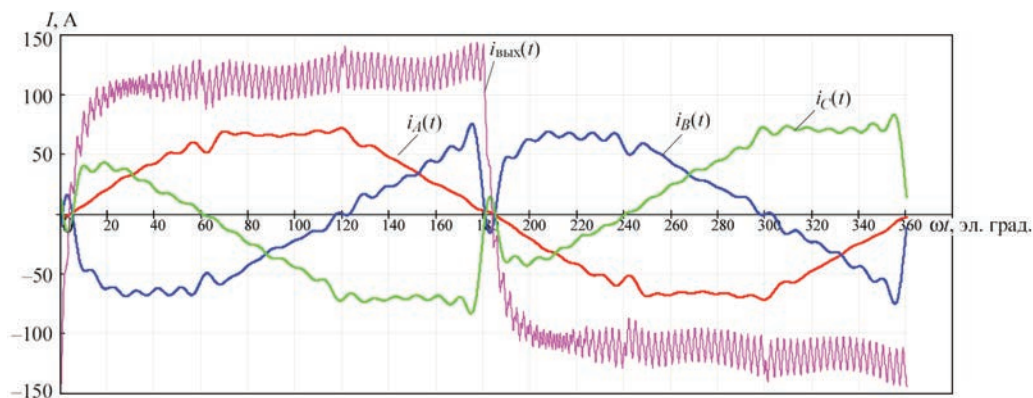


Рис. 5. Диаграммы входных токов МП с пятью ключами и его выходного тока

50 Гц и амплитудным значением 300 В; приведенные к первичной обмотке индуктивность рассеяния составляет 0,6 мГн, активное сопротивление 2,5 Ом; индуктивность входного фильтра 0,1 мГн, емкость входного фильтра 24 мкФ. Коэффициент несинусоидальности входного тока фазы, синхронизированной с выходным напряжением преобразователя, после фильтрации составляющих на частоте переключения, составляет около 6 %. Коэффициент мощности порядка 95,6 %, коэффициент несимметрии входных токов по обратной последовательности около 4 %.

Коэффициент мощности описанных ИП машин контактной сварки намного выше, чем у существующих тиристорных, который обычно не превышает 60 % [5]. При этом включение однофазной машины контактной сварки в трехфазную сеть с помощью описанных ИП не приводит к появлению несимметрии, а обеспечивает симметричное потребление токов, по форме близких к синусоидальным.

Применение МП для питания МКС дает еще один положительный эффект. При включении сварочного трансформатора от сети напрямую через тиристорный контактор [10] максимальное напряжение, подаваемое на первичную обмотку, достигает $\sqrt{3}U_{\phi}$. Выходное напряжение МП — не превышает $1,5U_{\phi}$. Однако при прямоугольной форме выходного напряжения МП с максимальной амплитудой $1,5U_{\phi}$ действующее значение первой гармоники напряжения составит $\frac{6}{\pi}U_{\phi}$, что позволяет уменьшить чувствительность к отклонениям напряжения сети, обеспечивая запас по напряжению порядка 10 % и повышая качество сварных соединений.

Применение описанных преобразователей и способа управления ими позволило добиться высокого качества сварочного процесса при кон-

тактной сварке, обеспечив при этом высокий коэффициент мощности ИП и электромагнитную совместимость его с электрической сетью

1. Письменный А. А. Повышение энергоэффективности машин для контактной точечной сварки за счет продольной компенсации реактивной мощности / А. А. Письменный // Автоматическая сварка. — 2014. — № 1. — С. 29 – 33.
2. Руденко П. М. Тиристорный преобразователь с непосредственной связью для питания контактных машин / П. М. Руденко, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. — 2013. — № 8. — С. 55–58.
3. Рымар С. В. Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть / С. В. Рымар, А. М. Жерносеков, В. Н. Сидоренко // Автоматическая сварка. — 2011. — № 12. — С. 9–15.
4. Сафронов П. С. Поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення для систем контактної зварювання / П. С. Сафронов, Ю. В. Бондаренко, О. Ф. Бондаренко [та ін.] // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 5. — С. 89–91.
5. Вагин Г. Я. Режимы электросварочных машин / Г. Я. Вагин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 192 с.
6. Поднебенная С. К. Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания при помощи параллельного активного фильтра с повышенной эффективностью / С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збір. наук. праць. — Краматорськ: ДДМА, 2012. — № 3 (28). — С. 221–226.
7. Wagner M. Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding / M. Wagner, S. Kolb // 15th European conference on power electronics and applications (EPE). — 2013. — P. 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6634720.
8. Saleem J. Power electronics for resistance spot welding equipment / J. Saleem // Mid Sweden University Licentiate Thesis. — Sundsvall. — 2012. — 42 p.
9. Лебедев В. К. Система питания для машин контактной сварки с транзисторным инвертором / В. К. Лебедев, А. А. Письменный // Автоматическая сварка. — 2003. — № 2. — С. 11–13.
10. Лебедев В. К. Система питания для машин контактной сварки / В. К. Лебедев, А. А. Письменный // Автоматическая сварка. — 2001. — № 11. — С. 28–32.
11. Поднебенная С. К. Особенности управления силовым параллельным активным фильтром / С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: зб. наук. праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у м. Кременчук, 9–11 квітня 2013 р. — Кременчук: КрНУ, 2013. — С. 168–169.

Поступила в редакцию 14.10.2016