

УДК: 621.311.6:621.791.76/.79

Асан уулу Аскат [asanaskat@gmail.com](mailto:asanaskat@gmail.com)

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
Кыргызстан, Бишкек, проспект Ч. Айтматова, 66

## СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

В статье рассмотрен метод управления трехфазным и однофазным матричным преобразователем с шестью ключами, позволяющий формировать выходное напряжение прямоугольной формы частотой 50 Гц [6].

Предложено схемное решение и способ управления матричным преобразователем с пятью ключами, что позволяет при генерации выходного напряжения, синхронизированного с сетью, получить коэффициент мощности ИП, близкий к единице.

**Ключевые слова:** аппарат для контактной сварки, источник питания, матричный преобразователь, коэффициент мощности, электромагнитная совместимость.

**Введение.** В работе исследованы проблемы обеспечения электромагнитной совместимости источников питания однофазных сварочных аппаратов с трехфазной питающей сетью. Были рассмотрены два основных направления: применение активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ) и разработка источников питания (ИП) с коррекцией коэффициента мощности (ККМ). Использование АФКУ позволяет использовать имеющееся сварное оборудование, но высокая стоимость ограничивает его широкое применение. ИП с ККМ предполагает применение преобразователей либо со звеном постоянного тока, либо с прямыми матричными преобразователями, ибо главным условием к ИП для сварочных аппаратов является возможность генерирования выходного напряжения заданной формы, амплитуды и частоты [6].

Источники питания (ИП) аппаратов для контактной сварки являются мощными нелинейными потребителями электрической сети. В большинстве из них применяются схемы управления тиристорами. Кроме того, подобные ИП, будучи преимущественно однофазными, при их подключении к трехфазной сети (особенно при включении и одновременной работе некоторых ИП сварочных агрегатов в разных фазах) оказывают на нее отрицательное влияние. Это проявляется в росте коэффициентов асимметрии и несинусоидальности напряжения [6]. Падение качества питающего напряжения в свою очередь влияет на качество сварки, притом особенно значимым приходит отклонение напряжения, которое при превышении 15% приводит к 100%-му браку (для коррозионностойких сталей 100% брака считается вызванным отклонением напряжения на значение более 10%) [6]. Таким образом, решение задачи обеспечения электромагнитной совместимости сварного оборудования с электросетью представляется актуальной задачей.

Решение указанной проблемы осуществляется двумя вариантами:

- применение дополнительных активных фильтров компенсирующих устройств (АФКУ) [6]

- разработка и применение ИП с коррекцией коэффициента мощности (ККМ) [5].

Осуществление первоначального варианта позволяет гарантировать требуемый коэффициент мощности (КМ) «источник сварного тока – АФКУ», уменьшит потери мощности в электрической сети, гарантирует симметричную нагрузку при работе однофазного источника питания в трехфазной сети. Плюсом подобного расклада представляется сохранение имеющегося сварного ИП в технологическом процессе без каких-нибудь доработок. Главным изъяном первого варианта представляется его невысокая рентабельность, так как цена АФКУ соизмерима с ценой самого ИП [6].

**Цель исследования** направлена в основном на снижение стоимости таких ИП, заключающаяся в разработке эффективного источника питания для аппарата контактной сварки (АКС), обеспечивающего высокое качество процесса сварки и электромагнитную совместимость с электросетью.

**Задача заключается** в доработке ИП в связи с развитием силовой электроники и появлением мощных и быстродействующих силовых выключателей, позволяющих коммутировать большие нагрузки. В работах [6–8] рассматривались схемные решения, направленные на обновление ИП за счет применения тиристорных преобразователей трехфазного напряжения в однофазные, позволяющие обеспечить симметричную нагрузку. Основным недостатком этих схем является высокий коэффициент потребления несинусоидальных токов (до 80–90%) и необходимость применения низкочастотного трансформатора, что связано с понижением частоты выходного напряжения, генерируемого тиристорным преобразователем.

На сегодняшний день наиболее эффективной является разработка ИП из биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ), которые созданы в основном на основе преобразователей мощности с промежуточным звеном постоянного тока (выпрямитель, промежуточное звено постоянного тока, инвертор). Включение подобных преобразователей к электросети выполняется посредством входного трехфазного LC-фильтра, изолирующего сеть от составляющих модулирующего тока, генерируемого преобразователем [6]. При симметричной системе сетевых напряжений применение неконтролируемых выпрямителей (например, шестипульсный) обеспечивает потребление симметричных токов от сети [8]. Но при несимметричном сетевом напряжении симметрия потребляемых токов тоже нарушается. Кроме этого, спектральный состав токов, потребляемых шестипульсным выпрямителем, не гарантирует его электромагнитную совместимость с сетью без установки АФКУ в соответствии с нормами, установленными ГОСТ 13109–97. Топологии инверторов, которые наиболее часто используются для таких ИП, – мостовая, полумостовая и двухтактная, поскольку дают обеспечение полного отсутствия постоянного составляющего магнитного потока в трансформаторах. Двухтактные и мостовые инверторы генерируют на выходе преобразователя биполярное напряжение, максимальное значение которого равно напряжению промежуточного контура. Недостатком двухтактного инвертора является необходимость использования переключателей, способных выдерживать удвоенное напряжение промежуточного контура. К недостаткам мостового инвертора можно отнести увеличенное количество силовых переключателей (четыре у моста против двух у двухтактных). Полумостовой инвертор, выполненный с двумя ключами, производит выходное напряжение, наибольшее значение которого равно половине напряжения промежуточного контура, что является его недостатком [7].

Установка корректора коэффициента мощности на входе преобразователя позволяет обеспечить потребление синусоидальных токов [7], однако несколько снижает технико-экономические характеристики источника питания в связи с увеличением количества управляемых переключателей мощности. На базе преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока достаточно эффективны, но их широкое применение сдерживается ценой. Кроме этого, есть проблема обеспечения надежности накопителя энергии в цепи постоянного тока, а также надобность введения специальных схем лимитирования тока заряда конденсаторов при подключении источника питания к сети [6].

**Постановка задачи.** Рассматривается сварочный трансформатор, преобразователь, установленный в первичной цепи трансформатора, и входной фильтр, включенный между преобразователем и сетью (рисунок 1).

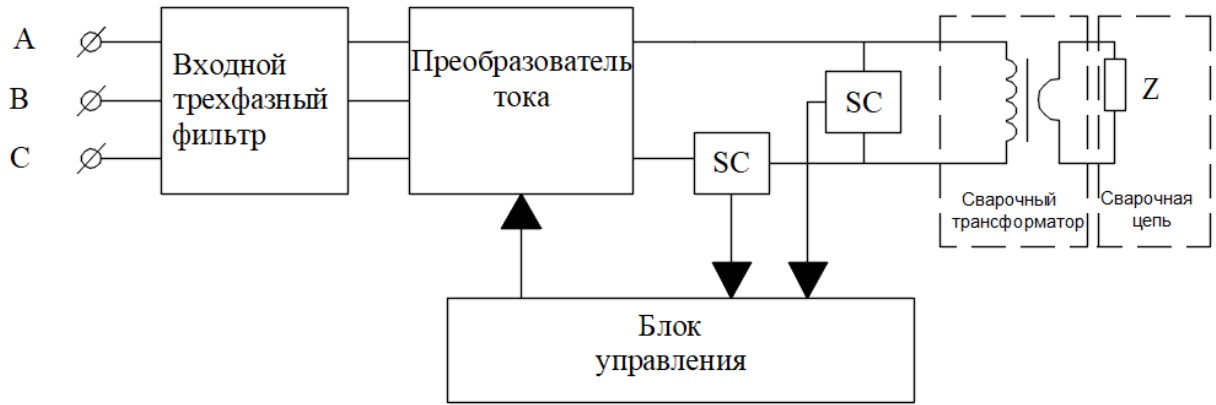


Рисунок 1 – Принципиальная блок-схема подключения сварочного аппарата к сети

Входными сигналами для управления преобразователем служат ток и напряжение, измеряемые датчиками (SC, SV) [6]. В качестве преобразователя тока предлагается использовать прямой матричный преобразователь (МП), особенностью которого является отсутствие промежуточного звена постоянного тока (конденсатора большой емкости), что значительно увеличивает технико-экономические показатели преобразователя. Трехфазный и однофазный МП состоят из шести двухнаправленных переключателей, каждый из которых включает одну из фаз сети непосредственно на нагрузку (рисунок 2). Выполнен в виде двух транзисторов с обратными диодами, имеющих встречно-последовательное соединение, а управляющие электроды БТИЗ подключены к блоку управления (БУ). Как правило, для того чтобы минимизировать потери мощности в электрической сети, при подключении к нему нагрузки можно добиться, обеспечив симметричность между потребляемыми токами и напряжениями [6]. Таким образом, МП должен моделировать симметричную активную нагрузку.

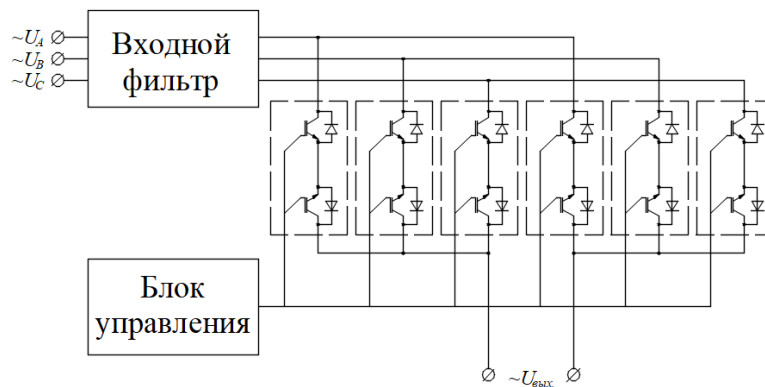


Рисунок 2 – Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя

**Решение.** Мгновенная активная мощность трехфазной сети определяется как сумма мгновенных активных мощностей всех трех фаз [8]:

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

где  $p_A(t) = (u_A(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы А; где  $p_B(t) = (u_B(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы В; где  $p_C(t) = (u_C(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы С;  $R$  – смоделированная активная нагрузка, Ом;  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$ ,  $u_C(t)$  – мгновенные фазные напряжения сети, В.

Для симметричных напряжений и нагрузки мгновенная мощность является постоянной величиной [6]. Но из-за отсутствия энергетического конденсатора сам МП не является потребителем активной мощности (без учета потерь мощности в силовых

переключателях, которым пока можно пренебречь). Следует из этого, чтобы обеспечить симметричное потребление токов, МП всегда должен потреблять постоянную активную мощность [6]:

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

где  $U(t)$  – выходное напряжение МП;  $I(t)$  – выходной ток МП.

Если пренебречь воздействием индуктивности сварной цепи на выходной ток преобразователя, то с возможной погрешностью можно предположить, что симметричное потребление токов МП возможно при генерации постоянного напряжения на его выходе. Но для постоянной составляющей тока, проходящего посредством первичной обмотки сварного трансформатора, это приведет к увеличению намагниченности и порядочным потерям мощности [6].

Этого можно избежать, изменив полярность 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 асимметричной системе сетевых напряжений мгновенная активная мощность трехфазной сети, определяемая выражением (1), не является постоянной величиной, тогда управление преобразователем может осуществляться из условия усредненной за период заданной активной мощности потребляемой мощности сети, которое регулируется изменением имитирующего активного сопротивления  $R$ . Здесь имитирующее активное сопротивление не должно изменяться в течение периода сети, чтобы не генерировать низкочастотные гармоники.

Рассмотрим симметричную систему напряжений и, согласно сделанному выше предположению, осуществим генерацию прямоугольного напряжения с частотой 50 Гц на выходе МП. Примем начальный фазовый сдвиг фазы напряжения  $A$ , равный нулю. Условно поделим период сети на шесть секторов: первому и четвертому сектору соответствует наибольшее абсолютное значение мгновенного напряжения фазы  $B$  (первое при отрицательном напряжении фазы  $B$ , четвертое – при отрицательном напряжении фазы  $B$ , положительной), второй и пятый – фазы  $A$  (вторая при положительном напряжении фазы  $A$ , пятая – отрицательной), третья и шестая – фазе  $C$  (третья – при отрицательном напряжении фазы  $C$ , шестой – на плюсе).

Рабочие циклы переключателей  $Q1 - Q6$  управляющих импульсов можно рассчитать по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{u_A(t)}{RI(t)}; & D_2 &= -\frac{u_B(t)}{RI(t)}; & D_3 &= -\frac{u_C(t)}{RI(t)}; \\ D_4 &= -D_1; & D_5 &= -D_2; & D_6 &= -D_3; \end{aligned} \quad (4)$$

**Полученные результаты.** Выбор необходимой пары переключателей для положительной полярности выходного напряжения происходит в блоке управления в соответствии с таблицей 1. Единичный рабочий цикл импульса в таблице означает, что в данном секторе переключатель включен постоянно. Для формирования выходного напряжения отрицательной полярности сигналы управления переключателями  $Q1 - Q3$  и  $Q4 - Q6$  меняются местами друг с другом (таблица 2).

Использование выходного напряжения с частотой 50 Гц дает еще один эффект: при синхронизации выходного напряжения с одним из сетевых напряжений (например, фазой  $A$ ) количество силовых переключателей преобразователя может быть уменьшено до пяти (рисунок 3). Рабочие циклы управляющих импульсов переключателей преобразователя с пятью переключателями рассчитаны в соответствии с (4) и представлены в таблице 3.

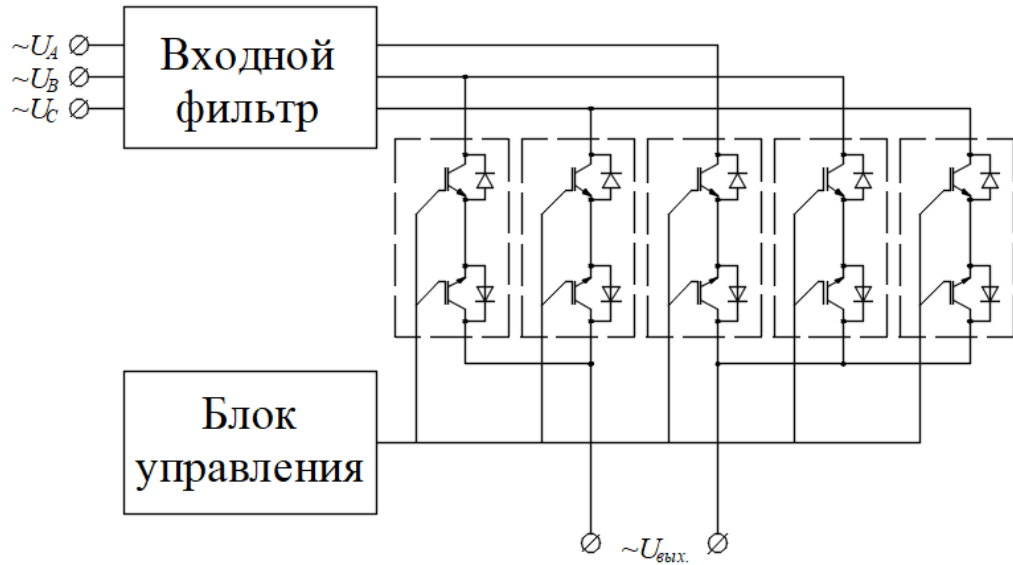


Рисунок 3 – Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя с пятью переключателями

Использование МП с пятью переключателями позволяет использовать все свойства и достоинства классических МП с шестью переключателями, исключая возможность изменения выходной частоты, но с учетом подавляющего большинства сварочных ИП, работающих с трансформатором промышленной частоты, и это не недостаток.

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от количества секторов для положительной полярности выходного напряжения.

Таблица 1

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

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от номера сектора для отрицательной полярности выходного напряжения (таблица 2).

Таблица 2

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	$1-D_4-D_3$	0	$D_2$	1	$D_2$	0
Q6	$D_3$	0	$1-D_1-D_2$	0	$D_3$	1

В результате математического моделирования в пакете MatLab были получены диаграммы входных токов, выходного напряжения и тока МП с пятью ключами (рисунки 4, 5). Параметры МП следующие: частота коммутации 3,2 кГц, заданное выходное напряжение прямоугольное, с частотой 50 Гц и значением амплитуды 300 В; индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке, составляет 0,6 мГн, активное сопротивление 2,5 Ом; индуктивность входного фильтра 0,1 мГн, емкость входного фильтра 24 мФ. Коэффициент несинусоидального входного тока фазы,

синхронизированного с выходным напряжением преобразователя, находящегося на частоте переключения после изменения компонентов, составляет около 5,5%. Коэффициент мощности около 94,8%, коэффициент несимметрии входных токов по обратной последовательности около 4%.

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от количества секторов для формирования выходного напряжения матричного преобразователя с пятью переключателями (таблица 3).

Таблица 3

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	$D_6$

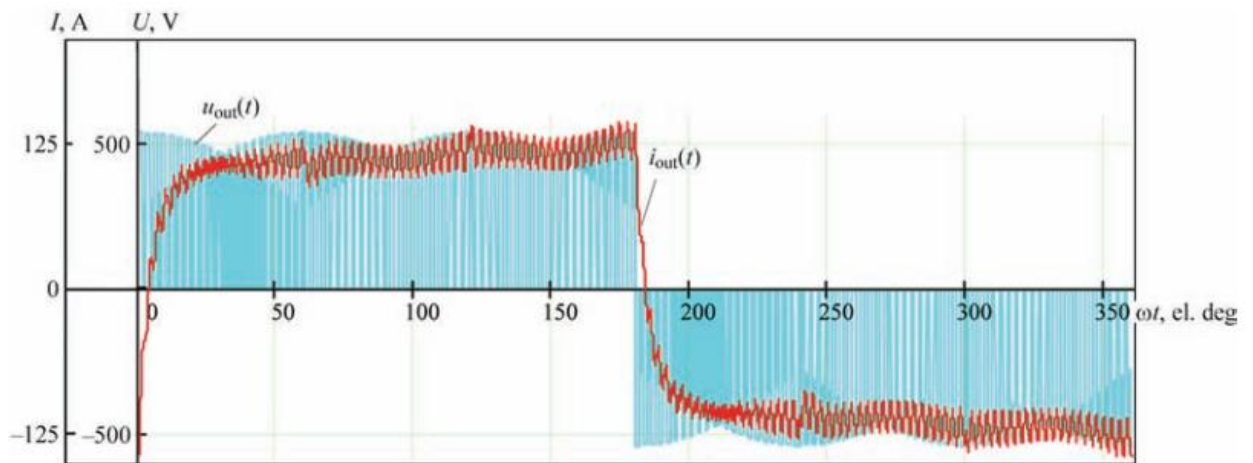


Рисунок 4 – Диаграммы выходных напряжений и тока матричного преобразователя с пятью ключами

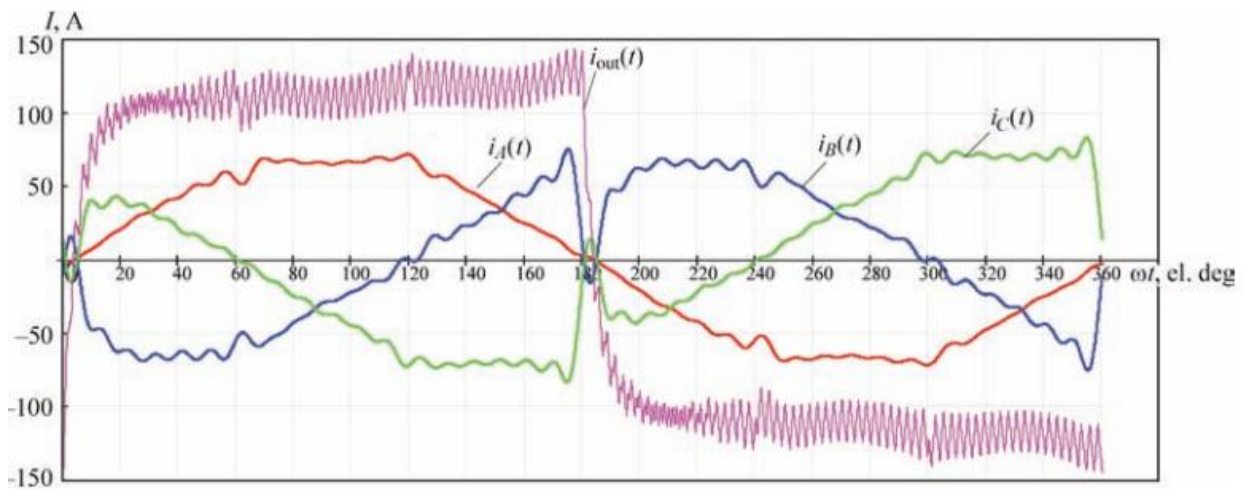


Рисунок 5 – Диаграммы входных токов матричного преобразователя с пятью ключами и его выходные токи

Выбор частоты был предопределен применением сварочного трансформатора, рассчитанного на работу от сетевой частоты. Форма напряжения выбиралась из условий обеспечения минимальных потерь мощности в сети и недопустимости насыщения сварочного трансформатора. Коэффициент мощности описываемых ИП аппаратов контактной сварки значительно выше, чем у использующих тиристорные ИП, который обычно составляет около 60% [5]. Кроме того, переключение аппарата однофазной контактной сварки на трехфазную сеть с использованием описанного ИП не приводит к возникновению асимметрии и обеспечивает симметричное потребление токов, близкое по форме к синусоидальному.

Еще один положительный эффект дает применение МП для питания АКС. При переключении сварочного трансформатора от сети напрямую через БТИЗ контактор [10]  $U_{\max}$ , подаваемое на первичную обмотку, достигает  $\sqrt{3}U_{\phi}$ . Выходное напряжение МП не выше  $1,5U_{\phi}$ . Но при прямоугольной форме  $U_{\text{вых}}$  МП с максимальной амплитудой  $1,5U_{\phi}$  фактическое значение первой гармоники напряжения будет составлять  $6U_{\phi}/\pi$ , что позволяет снизить чувствительность к отклонениям сетевого напряжения, обеспечить запас по напряжению около 10% и повысить качество сварных соединений.

### Заключение

1. По результатам моделирования применение описанных преобразователей и способы их управления позволили добиться высокого качества процесса контактной сварки, обеспечив тем самым высокий коэффициент мощности ИП и его электромагнитную совместимость с питающей электросетью.

2. Был выполнен обзор чувствительности порекомендованного источника питания к отклонениям напряжений, вследствие которого установлено, что при генерации напряжения прямоугольной формы можно добиться стабильной работы при отклонениях напряжения около 10%, что связано со значительным повышением качества сварных соединений.

### Литература

1. Pismenny, A.A. (2014) Improvement of power efficiency of machines for resistance spot welding by longitudinal compensation of reactive power. The Paton Welding J., 1, 25–29.

2. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2013) Thyristor direct converters for supply of resistance welding machines. Ibid., 8, 54–56.

3. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N. (2011) Effect of single-phase power sources of welding arc on electric mains. Ibid., 12, 7–12.

4. Сафронов П.С., Бондаренко Ю.В., Бондаренко О.Ф. (2014) Улучшение электромагнитной совместимости мощных источников для систем контактной сварки. Технична Электродинамика. – №5. –89–91.

5. Вагин, Г.Я. (1985) Режимы электросварочных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат.

6. Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В., Скосырев В. Г. (2017) Источник питания машины контактной сварки с улучшенной электромагнитной совместимостью. Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: технические науки. №35. – 162–168.

7. Вагнер М., Колб С. (2013) Повышение эффективности для высокочастотной контактной точечной сварки. В: Proc. 15-й Европейская конф. по силовой электронике и приложениям (EPE), 1–9.

8. Омельченко Е. Я. Мощность при переходных процессах в трёхфазной LR-цепи. –М.: 2008. – Электрика. – С. 34–38.

9. Эралиева Г. Ш., Абдыбаева Ж. К., Асан уулу А., Суюнтбекова Н. А. Исследование переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе компьютерного моделирования. – Б., 2021. – Проблемы автоматизации и управления №2(41), 100–108.

10. Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. Расширенные варианты использования гидроветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы. Проблемы автоматизации и управления. –Б. 2021.– №3(42).– С. 4–14.