

УДК 621.314, 621.791

А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, В.А. Федотов, И.К. Идрисов

Формирователь импульсов сварочного тока на основе двухтрансформаторного комбинированного преобразователя

Предложена новая схема формирователя импульсов тока для электродуговой импульсной сварки на основе двухтрансформаторного комбинированного преобразователя (ДКП). Проведена оценка влияния паразитных параметров ДКП и времени выключения силовых ключей на скорость нарастания тока при формировании фронта импульса.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, формирователь импульсов тока, двухтрансформаторный комбинированный преобразователь.

Известны импульсные технологии сварки и наплавки материалов, которые позволяют значительно расширить границы возможностей стационарных процессов. По сравнению со стационарными импульсные технологии [1] обеспечивают управление такими параметрами сварочного процесса, как перенос и кристаллизация металла, независимо от пространственного положения сварочной ванны при значительно меньших средних значениях сварочного тока; позволяют в 2–3 раза увеличить скорость кристаллизации сварочной ванны; уменьшить степень деформационных процессов в сварочных конструкциях или наплавленных поверхностях и повысить механические свойства соединений.

Для реализации режимов импульсно-дуговой сварки, описанных в [2, 3], необходим источник питания, способный накладывать импульсы тока той же полярности на непрерывно горящую дугу нормальной мощности. Амплитуда тока импульсов $I_{\text{и}}$ должна быть в 6–12 раз больше «дежурного» тока сварки $I_{\text{св}}$; длительность импульсов $t_{\text{имп}} = 1\text{--}3,5$ мс; частота повторения импульсов $f_{\text{имп}} = 25\text{--}300$ импульсов в секунду; скорость нарастания тока в импульсе $di/dt = (0,7\text{--}7) \cdot 10^6$ А/с.

Для реализации технологии импульсно-дуговой сварки применяются специальные [1] формирователи импульсов, подключаемые параллельно или последовательно с основным источником, которые обеспечивают формирование прямоугольных импульсов тока с необходимыми скоростями нарастания и спада, регулирование частоты, длительности и амплитуды импульсов при гальванической развязке с сетью.

Известны схемы формирователей импульсов тока на основе искусственных формирующих линий [4–6], емкостных накопителей [7, 8] или индуктивных накопителей [9]. Недостатками таких схем является то, что энергия, требуемая для формирования импульса, ограничена размерами индуктивных или емкостных накопителей.

В [10] авторами предложена система энергообеспечения импульсных сварочных процессов на основе высокочастотных модулей, каждый из которых может выполнять роль как основного источника, так и формирователя. Причем из $N = m + n$ модулей, образующих систему энергообеспечения, m могут выполнять роль формирователя импульсов тока, а остальные n – роль основных источников при любых значениях m и n .

В основу построения модулей положен двухтрансформаторный комбинированный преобразователь (ДКП) [11], схема которого представлена на рис. 1. Этот преобразователь получен из известного двухтрансформаторного преобразователя [12] путем введения в него дополнительного транзистора VT_5 и диода VD_1 . Добавление новых элементов в схему преобразователя позволяет реализовать два различных режима работы преобразователя: обычный режим работы ДП или «двухтактный» режим и «однотактный» режим, при котором используется транзистор VT_5 и диод VD_1 .

В однотактном режиме работы ДКП включается дополнительный транзистор VT_5 вместе с транзисторами VT_1 и VT_3 , что обеспечивает запасание электромагнитной энергии в дросселях трансформаторах TV_1 и TV_2 и передачу ее в нагрузку через диоды VD_2 и VD_3 при выключении всех транзисторов, как в обратномходовом преобразователе. При этом максимально достижимое напряжение на нагрузке в однотактном режиме будет определяться как для обратномходового преобразователя:

$$U_{\text{НГТ}} = E \frac{W_2 \cdot D}{W_1(1-D)} = K_{\text{ТР}} E \frac{D}{1-D}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ТР}}$ – коэффициент трансформации дросселя-трансформатора; W_1 и W_2 – количество витков в его обмотках соответственно; E – значение напряжения питания преобразователя; D – относительная длительность импульса.

В двухтактном режиме максимальное напряжение на нагрузке будет определяться [13] соотношением

$$U_{H2T} = \frac{1}{2} K_{TP} E \cdot D. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) видно, что в однократном режиме можно получить в $2/(1-D)$ раз большее напряжение, однако из-за обратных диодов силовых ключей и диода VD_1 увеличить выходное напряжение в однократном режиме, без завышения габаритной мощности преобразователя, можно только в два раза.

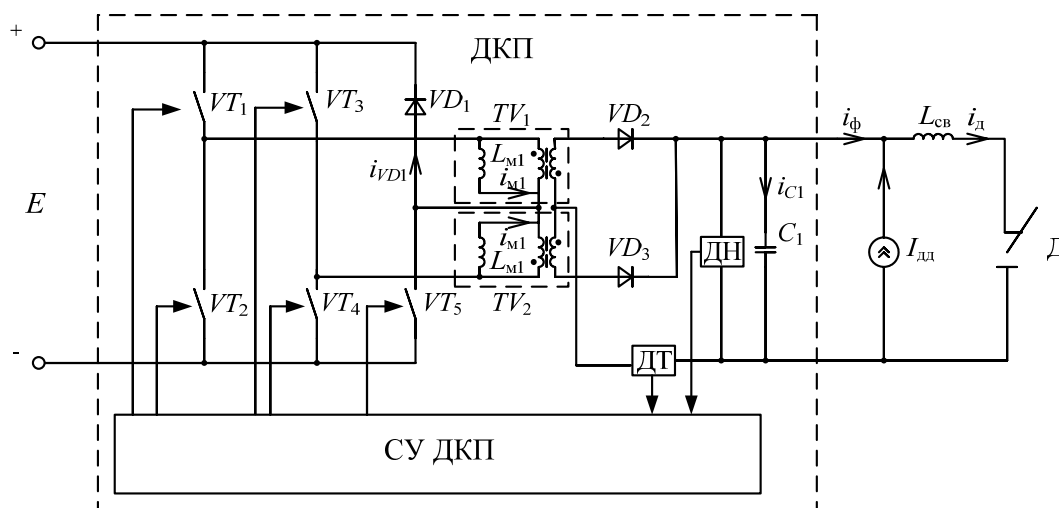


Рис. 1. Схема формирователя на основе ДКП, подключенного параллельно «дежурному» источнику питания

Эту возможность преобразователя можно эффективно использовать в источниках электропитания с нелинейной нагрузкой типа электрическая дуга. Для зажигания электрической дуги или формирования фронта импульса тока, когда необходимо получить повышенное напряжение, нужно перейти в однократный режим, а в режиме стабилизации сварочного тока, когда требуется меньшее напряжение, перейти в двухтактный режим работы. Важно, что полученное таким образом удвоение напряжения не приводит к завышению габаритной мощности трансформаторов-дросселей.

Таким образом, в ДКП принципиально реализуем однократный режим работы, при котором выходное напряжение повышается в два раза, что является несомненно актуальным для источников питания сварочной дуги. Целью этой работы является исследование характеристик формирователя импульсов тока на основе ДКП и получение основных расчетных соотношений, позволяющих определить возможные скорости нарастания формируемых импульсов тока.

На рис. 1 приведена схема формирователя импульсов тока на основе ДКП [11], подключенного параллельно с основным источником сварочного тока $I_{дд}$ к нагрузке в виде электрической дуги D . Источник тока $I_{дд}$ представляет собой источник «дежурного» тока. На схеме приведена индуктивность сварочного контура $L_{св}$, учет которой объясняется тем, что она оказывает значительное влияние на работу преобразователя. Дроссели-трансформаторы TV_1, TV_2 представлены эквивалентными схемами с идеальным трансформатором и индуктивностями контуров намагничивания $L_{M1}(L_{M2})$, включенных параллельно первичным обмоткам.

Процесс формирования импульса тока дуги i_d представлен на рис. 2. К моменту времени t_0 все ключи преобразователя разомкнуты, энергия в многообмоточных дросселях-трансформаторах отсутствует (токи в индуктивностях намагничивания L_{M1} и L_{M2} равны нулю), электрическая дуга поддерживается источником дежурного тока $I_{дд}$, конденсатор C_1 заряжен этим источником тока до напряжения дуги $U_d = f(I_{дд})$.

Для формирования переднего фронта импульса необходимо заранее запастись энергией в L_{M1} и L_{M2} трансформаторов TV_1 и TV_2 , поэтому в момент времени t_0 замыкаются ключи VT_1, VT_3 и VT_5 . К первичным обмоткам трансформаторов TV_1 и TV_2 прикладывается напряжение источника питания E , диоды VD_2, VD_3 выключены. Токи в индуктивностях контуров намагничивания линейно возрастают.

В момент времени t_1 токи в L_{M1} и L_{M2} достигает заданного значения I_{M0} , ключи VT_1 , VT_3 , VT_5 размыкаются, токи L_{M1} и L_{M2} трансформируются во вторичные обмотки и через диоды VD_2 , VD_3 замыкаются в конденсаторе C_1 и нагрузке. Напряжение u_{C1} на конденсаторе C_1 начинает возрастать, диод VD_1 и обратные диоды транзисторов VT_2 , VT_4 остаются закрытыми, пока напряжение на конденсаторе u_{C1} не достигнет значения $U_{C1} = K_{TP} \cdot E$ в момент времени t_2 .

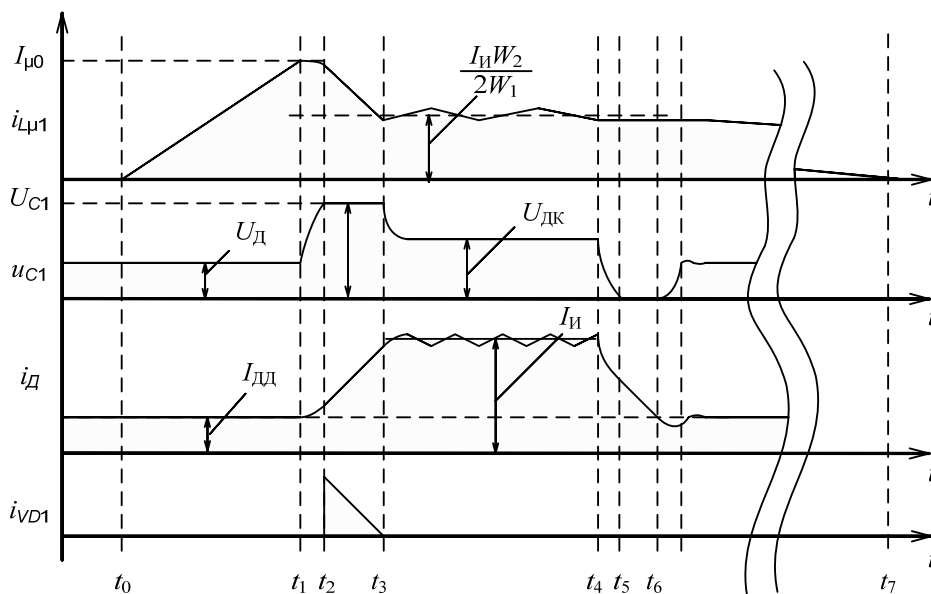


Рис. 2. Временные диаграммы процесса формирования импульса тока дуги

Диод VD_1 и обратные диоды транзисторов VT_2 и VT_4 открываются и токи индуктивностей L_{M1} и L_{M2} частично возвращаются в источник питания E , замыкаясь по двум контурам через источник питания и нагрузку. На интервале времени $t_2 \dots t_3$ происходит нарастание тока в нагрузке с максимальной возможной скоростью, определяемой разностью $U_{C1} - U_D$ и значением индуктивности L_{CB} . При этом часть энергии возвращается в источник питания E .

В момент времени t_3 суммарный ток индуктивностей контура намагничивания, приведенный к вторичной обмотке, станет равным заданному току импульса $I_{И}$, обратные диоды транзисторов VT_2 , VT_4 и диод VD_1 выключаются, формирование фронта тока импульса заканчивается. Для формирования вершины импульса необходимо перевести ДКП в режим стабилизации тока – «двухтактный» режим. Напряжение на выходной емкости C_1 снижается до величины, равной напряжению на дуге $U_{ДК}$ при токе дуги, равном $I_{И}$. Алгоритм управления ключами ДКП в двухтактном режиме, диаграммы токов в индуктивностях контуров намагничивания и на выходе ДКП приведены на рис. 3. В этом режиме работы ДКП ничем не отличается от работы [12, 13] двухтрансформаторного преобразователя напряжения. Стабилизация выходного тока в ДКП обеспечивается несимметричным алгоритмом управления ключей. ДКП, в отличие от двухтрансформаторного преобразователя, не может работать в режиме фазового управления инвертором из-за диода VD_1 . В двухтактном режиме ДКП может находиться сколь угодно долго, что обеспечивает неограниченную длительность импульса.

Формирование заднего фронта в момент времени t_4 обеспечивается замыканием ключей VT_2 , VT_4 , VT_5 и размыканием ключей VT_1 , VT_3 . Ток индуктивностей намагничивания L_{M1} и L_{M2} замыкается через замкнутые ключи VT_2 , VT_4 и VT_5 , преобразователь отключается от нагрузки. Ток индуктивности сварочного контура L_{CB} замыкается через выходную емкость. В момент времени t_5 напряжение емкости станет равным нулю и откроются диоды VD_2 , VD_3 . С этого момента времени разность токов $i_p = i_D - I_{ДД}$ будет замыкаться через диоды, вторичную и первичную обмотки трансформаторов, ключи инвертора. Скорость уменьшения тока в нагрузке будет определяться значением индуктивности L_{CB} и напряжением U_D на дуге. В момент времени t_6 ток электрической дуги i_D спадает до значения тока $I_{ДД}$ и диоды VD_2 , VD_3 выключаются, источник дежурного тока $I_{ДД}$ заряжает емкость C_1 до напряжения на дуге U_D и поддерживает ток в нагрузке до прихода следующего импульса. Ток в первичных обмотках трансформаторов и открытых ключах инвертора VT_2 , VT_4 и VT_5 будет уменьшаться за счет потерь на открытых ключах и активного сопротивления обмоток трансформатора. В момент времени t_7 ток в индуктивности намагничивания L_{M1} и L_{M1} уменьшится до нулевого значения. Далее процессы повторяются.

Преимущество формирователя импульсов тока на основе ДКП перед другими видами преобразователей заключается в том, что энергия, запасаемая в реактивных элементах преобразователя, нужна только для формирования фронта импульса. В отличие от других формирователей, где в реактивных элементах запасается энергия на время всего импульса, в ДКП импульс тока в нагрузке формируется за счет энергии источника питания. Это значительно улучшает массогабаритные показатели формирователя при увеличении длительности импульса. К тому же ДКП может являться источником сварочного тока, когда формирование импульсов не требуется.

Как было отмечено выше, скорость нарастания фронта импульса тока зависит от значения индуктивности сварочного контура L_{CB} и от значения емкости C_1 . Кроме того, на скорость нарастания тока будет влиять скорость выключения ключей VT_1, VT_3, VT_5 . Точное определение скорости нарастания тока di/dt представляет собой сложную задачу, т.к. в процессе формирования участвуют четыре реактивных элемента $L_{M1}, L_{M2}, C_1, L_{CB}$ и три ключа на транзисторах IGBT или MOSFET. Задачу оценки достижимой скорости нарастания тока можно упростить, если рассмотреть влияние каждого из элементов независимо друг от друга.

Если принять значение индуктивности L_{CB} и емкости C_1 равными нулю, то скорость нарастания тока будет определяться скоростью выключения транзисторных ключей. Из справочных данных на силовые полупроводниковые транзисторы известно, что чем больше значения тока непосредственно перед закрытием транзистора, тем больше время его закрытия. Из алгоритма работы схемы ДКП можно определить, что в момент времени t_1 через ключ VT_5 протекает удвоенное значение тока I_{M0} , в то время как через VT_1 и VT_2 протекают токи, равные I_{M0} . Таким образом, можно сделать вывод, что время t_{3VT5} закрытия ключа VT будет определять di/dt .

При принятых допущениях закон изменения тока i_D будет определяться выражением

$$i_D = I_{ДД} + \frac{2 \cdot I_{M0}}{K_{ТР} \cdot t_{3VT5}} \quad (3)$$

Тогда скорость нарастания тока в дуге вычисляется по формуле

$$di_D / dt = \frac{2 \cdot I_{M0}}{K_{ТР} \cdot t_{3VT5}} \quad (4)$$

Подставим возможные численные значения в выражение (4) для нескольких типов силовых IGBT и MOSFET ключей, которые можно применить в данном преобразователе. При питании преобразователя от выпрямленного промышленного трехфазного напряжения 3×380 В, с номинальным напряжением на электрической дуге 44 В и максимальным напряжением (холостого хода) дуги 88 В, $K_{ТР} \approx 0,1-0,2$. При увеличении максимального напряжения на дуге до 176 В $K_{ТР} \approx 0,2-0,4$. Значение I_{M0} для расчета будем принимать равным половине значения предельного тока через транзистор $I_{П}$, время t_{3VT} выбираем из документации на транзистор при коммутации предельного значения тока.

Амплитуда тока в импульсе может значительно превышать 600 А, поэтому номинальное напряжение на электрической дуге принимается 44 В согласно ГОСТ Р МЭК 60974-1-2004 для сварки полуавтоматическим и автоматическим способом в среде защитных газов.

Результаты расчета скорости нарастания тока на выходе ДКП при изменении коэффициентов трансформации и различных типах силовых ключей сведены в табл. 1.

Из приведенных значений достигаемых скоростей нарастания тока видно, что скоростью выключения силовых ключей можно пренебречь, т.к. полученные значения даже при использовании силового IGBT-модуля PM100CSA120 значительно выше требуемого.

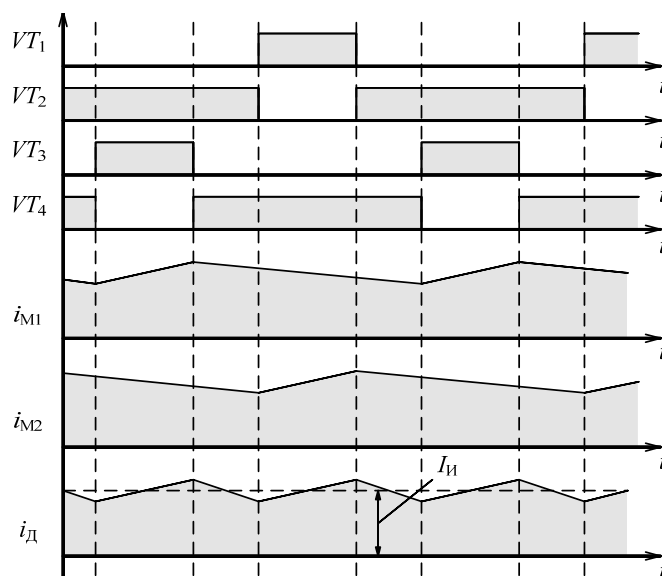


Рис. 3. Алгоритм управления ключами ДКП в двухтактном режиме и временные диаграммы токов намагничивания

Таблица 1

**Результаты расчета скоростей нарастания тока на выходе ДКП
при использовании различных типов силовых ключей**

Используемые ключи	t_{3VT} , мкс	$I_{П}$, А	Расчетная скорость нарастания тока di/dt , 10^6 А/с		
			$K_{ТР} = 0,4$	$K_{ТР} = 0,2$	$K_{ТР} = 0,1$
IGBT-модуль					
PM100CSA120	1,2	100	208	417	833
IGBT-транзисторы					
IRG4PH50U	0,28	24	214	429	857
IRGPS40B120U	0,033	40	3030	6061	12121
MOSFET-транзисторы					
IRFPS40N60K	0,060	38	1583	3167	6333

Рассмотрим влияние индуктивности $L_{СВ}$ на фронт импульса тока. Примем ключ VT_5 идеальным, для которого t_{3VT5} равно нулю. Значение емкости C_1 также примем равным нулю. Эквивалентная схема ДКП в момент формирования фронта представлена на рис. 4, а. На рис. 4, б представлена упрощенная схема ДКП после приведения всех элементов к вторичной цепи преобразователя. При этом дуга заменена источником ЭДС.

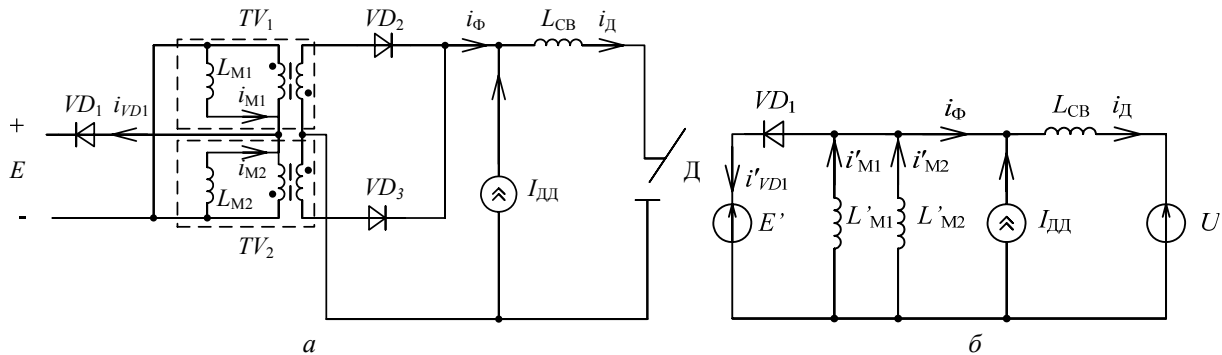


Рис. 4. Эквивалентная схема ДКП в момент формирования фронта импульса: а – полная; б – упрощенная

Закон изменения тока $i_{Д}$ в этом случае будет определяться выражением

$$i_{Д} = I_{ДД} + \frac{E \cdot K_{ТР} - U_{Д}}{L_{СВ}}. \quad (5)$$

И, соответственно, скорость нарастания будет

$$di_{Д}/dt = \frac{E \cdot K_{ТР} - U_{Д}}{L_{СВ}}. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в случае если $L_{СВ} \neq 0$, то часть энергии, запасенной в L_{M1} и L_{M2} , возвращается в источник питания ДКП и поэтому амплитуда импульса, получаемая в результате формирования, изменяется.

Значение индуктивности сварочного контура может изменяться от 1 до 40 мкГн в зависимости от длины кабеля, его сечения и значения сварочного тока. Результаты расчета скорости нарастания тока для нескольких типовых значений $L_{СВ}$ и $K_{ТР}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчета скоростей нарастания тока на выходе ДКП
при различных силовых значениях индуктивности сварочного контура**

Значение индуктивности $L_{СВ}$, мкГн	Расчетная скорость нарастания тока di/dt , 10^6 А/с		
	$K_{ТР} = 0,4$	$K_{ТР} = 0,2$	$K_{ТР} = 0,1$
1	172	64	10
10	17,2	6,4	1
20	8,6	3,2	0,5
40	4,3	1,6	0,25

Рассматривать влияние значения емкости конденсатора C_1 на скорость нарастания фронта импульса без учета индуктивности $L_{СВ}$ нецелесообразно т.к. ток I_{M0} , накопленный в L_{M1} и L_{M2} , в этом

случае будет мгновенно трансформироваться во вторичную обмотку и замыкаться через дуговой разряд. При этом напряжение на C_1 изменяться не будет. Поэтому целесообразно рассматривать только их совместное влияние.

Эксперименты на математической модели ДКП по определению совместного влияния L_{CB} и C_1 были проведены в работе [14] и представлены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показана зависимость максимальной амплитуды импульса I от величины емкости C_1 при значении $K_{TP} = 0,18$, I_{M0} для всех экспериментов было одинаково. На рис. 6 представлены результаты расчета di/dt проведенных экспериментов.

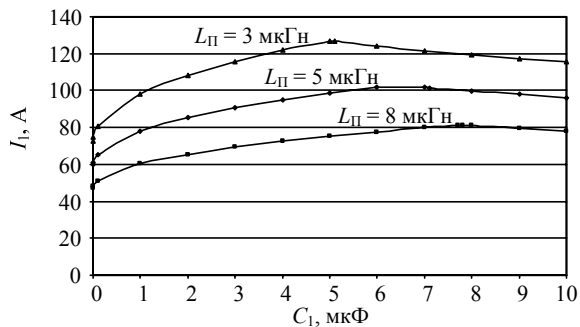


Рис. 5. Зависимость амплитуды тока i_d от емкости выходного конденсатора C_1 и индуктивности сварочного контура L_{CB}

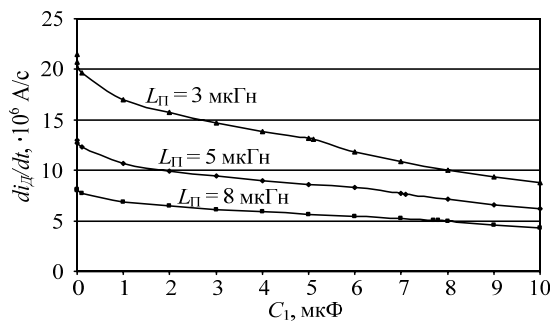


Рис. 6. Зависимость скорости нарастания тока di_d/dt от емкости выходного конденсатора C_1 и индуктивности сварочного контура L_{CB}

Выводы. Получены расчетные и экспериментальные данные по величине скорости нарастания тока при формировании фронта импульса, показывающие, что в ДКП достигаются скорости нарастания, необходимые в технологиях импульсно-дуговой сварки, описанные в [2, 3].

Показано, что для оценки величины скорости нарастания тока в нагрузке с учетом индуктивности сварочного тока и выходной емкости транзисторы можно считать идеальными ключами. Влияние времени выключения силовых полупроводниковых ключей (MOSFET и IGBT) значительно меньше, чем влияние индуктивности сварочного контура и емкости C_1 , поэтому при требуемых скоростях нарастания тока времена выключения ключей можно не учитывать.

Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить скорость нарастания тока ДКП в нагрузке при учете индуктивности сварочного контура.

Установлено, что добавление емкости C_1 на выход ДКП приводит к снижению скорости нарастания тока импульса, но при этом амплитуда формируемого импульса увеличивается, что можно эффективно использовать в тех случаях, когда требуется невысокая скорость нарастания тока.

Литература

1. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 108 с.
2. А.с. 247 430 СССР, МПК Н 05b. Способ импульсно-дуговой сварки / Б.Е. Патон, А.Г. Потапьевский (СССР). – № 909520/25-27; заявл. 02.07.64; опубл. 04.07.69. Бюл. № 22. – 2 с.
3. А.с. 162 262 СССР, МПК Н 06b. Способ автоматической (полуавтоматической) импульсно-дуговой сварки / Б.Е. Патон, А.Г. Потапьевский (СССР). – № 776778/25-8; заявл. 03.05.62; опубл. 22.12.69. Бюл. № 3. – 2 с.
4. Пат. 2 343 051 РФ, МПК В 23 К 9/09, Н 03 К 3/53. Устройство для формирования импульсов сварочного тока / А.Ф. Князьков, В.Л. Князьков, О.С. Бирюкова, В.А. Устинов (РФ). – № 2007120782/02; заявл. 04.05.07; опубл. 10.01.09. Бюл. №1. – 3 с.
5. Пат. 2 294 269 РФ, МПК В 23 К 9/09, Н 03 К 3/53. Устройство для формирования импульсов сварочного тока / А.Ф. Князьков, С.Л. Князьков, Я.С. Лолю, А.Б. Проняев (РФ). – № 2005133160/02; заявл. 27.10.05; опубл. 27.02.07. Бюл. №6. – 6 с.
6. Пат. 2 175 596 РФ, МПК В 23 К 9/10. Устройство для сварки / А.Ф. Князьков, В.Т. Федько, С.А. Князьков, Н.Ю. Крампит, А.Г. Крампит (РФ). – № 2 000 107 229 / 02; заявл. 23.03.00; опубл. 10.11.01. Бюл. №11. – 4 с.
7. Пат. 2 031 541, МПК Н 03 К 3/53. Устройство для питания импульсной нагрузки от емкостного накопителя / В.В. Додотченко, А.Г. Николаев, В.К. Быстров (РФ). – № 5 054 527 / 10; заявл. 17.07.92; опубл. 20.03.95. Бюл. №7. – 8 с.

8. Пат. 2 021 643, МПК Н 03 К 3/53. Система для питания импульсной нагрузки / В.В. Додотченко, А.Г. Николаев (РФ). – № 5 024 534 / 21; заявл. 17.04.92; опубл. 15.10.94. Бюл. №27. – 10 с.
9. Пентегов И.В. О новом зарядно-разрядном цикле в источниках питания с индуктивными накопителями энергии / И.В. Пентегов, Е.П. Стемковский, Д.А. Шейковский // Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». Тематичний випуск. – 2000. – Ч. 6. – С. 48–50.
10. Пат. 91 915, МПК В 23 К 9/00, Н 02 М 3/22. Источник питания сварочной дуги постоянного тока / В.А. Федотов, В. Д. Семенов (РФ). – № 2 009 130 655 / 22; заявл. 10.08.09; опубл. 10.03.2010 10.10.09. Бюл. № 7. – 9 с.
11. Пат. 87 379, МПК В 23 К 9/00, Н 02 М 3/22. Преобразователь постоянного напряжения сварочной дуги постоянного тока / В.А. Федотов, В.Д. Семенов (РФ). – № 2009120814/22; заявл. 01.06.09; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28. – 7 с.
12. А.с. 1 541 726. МПК Н 04М 3/315, 3/337. Преобразователь постоянного напряжения в постоянное / А.И. Царенко, А.Д. Ноникашвили (СССР). – № 4415938/24-07; 4443834/24-07; заявл. 24.04.88; опубл. 07.02.90. Бюл. № 5. – 6 с.
13. Гусев Б. Транзисторный двухтрансформаторный мостовой преобразователь постоянного напряжения / Б. Гусев, Д. Овчинников // Силовая электроника. – 2005. – №2. – С. 48–52.
14. Идрисов И.К. Исследование комбинированного двухтрансформаторного преобразователя в режиме наброса тока нагрузки / И.К. Идрисов, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Материалы НТК «Научная сессия ТУСУР». – 2010. – Ч. 4. – С. 135–138.

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. промышленной электроники, президент ТУСУРа

Тел.: +8-382-2-51-05-30

Эл. почта: office@tusur.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа

Тел.: +7-913-821-22-92

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Федотов Владимир Александрович

Зав. лаб. ГПО каф. промышленной электроники ТУСУРа

Тел.: +7-906-957-03-63

Эл. почта: fva@ie.tusur.ru

Идрисов Ильдар Камильевич

Электроник каф. промышленной электроники ТУСУРа

Тел.: +7-923-404-04-22

Эл. почта: idr-ildar@sibmail.com

Kobzev A.V., Semenov V.D., Fedotov V.A., Idrisov I.K.

Welding current pulse former on the basis of two-transformer combination converter

There is a new scheme of current pulse to an electric pulse welding generator on the basis of two-transformer combination converter (TTCC). We investigated the influence of parasitic circuit elements and the influence of the off-time of the TTCC power switches on the rate of current rise in the pulse formation.

Keywords: pulsed arc welding, pulse shaper current, two-transformer combination converter.