

УДК 621.9.048.7:004.94

Д. М. ЛАЗАРЕВ, А. Р. ФАТКУЛЛИН, Е. В. ПАРФЕНОВ, А. И. ДАУТОВ**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ В ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

Рассмотрено моделирование импульсного источника питания для проведения технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования, построенного по вольтоповышающей схеме; широтно-импульсная схема управления синхронизируется с питающей сетью. Получены временные диаграммы токов и напряжений на ответственных элементах схемы при работе на активную нагрузку и эквивалентную активно-реактивную схему замещения электролизера. Определены области безопасных режимов. Даны рекомендации для построения источников питания для технологических установок плазменно-электролитического оксидирования. *Плазменно-электролитическое оксидирование; источник питания; моделирование электронных схем*

ВВЕДЕНИЕ

С развитием гальванических процессов появилось новое направление в области финишной обработки поверхности — электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая является одним из наиболее экспрессных и экологически безопасных способов обработки поверхности материала, позволяющих получать функциональные покрытия различного назначения. Защитные керамикоподобные покрытия на сплавах алюминия, титана, циркония, магния, получаемые при плазменно-электролитическом оксидировании (ПЭО), находят все большее применение в авиационной, автомобильной, судостроительной и других областях промышленности [1]. Подобные покрытия с различной пористостью обладают высокой износо-, термо- и коррозионной стойкостью, хорошими электроизоляционными и декоративными свойствами [2, 3].

Основным отличием электролитно-плазменной обработки от общеизвестных электрохимических процессов является использование высоких напряжений (от 200 до 800 В). При ЭПО вентильных металлов на поверхности раздела «обрабатываемая деталь-электролит» появляются микрозаряды благодаря высокой напряженности электрического поля в оксидной пленке на поверхности детали. Наряду с классическими электрохимическими реакциями в рассматриваемой системе, процессу ЭПО характерно наличие высокотемпературных химических реакций, транспортное вещество в электрическом раз-

ряде, электроэрозионное и гидродинамическое воздействие на поверхность [4, 5].

Для практической реализации ЭПО требуется создание соответствующих источников питания, являющихся составной частью установки, к которым предъявляются специфические требования, направленные на достижение требуемых характеристик получаемых покрытий. Электролизер для проведения процесса электролитно-плазменной обработки представляет собой сложную электрическую частотно-зависимую нагрузку для источника питания, изменяющуюся во времени и содержащую участки вольтамперной характеристики с отрицательным динамическим сопротивлением. Поэтому разработка современных технологических источников питания для ЭПО требует анализа влияния такой нагрузки на работу источника. Использование современных средств моделирования позволяет повысить эффективность подобного анализа, так как процесс формирования уравнений, описывающих электромагнитные процессы в системах силовой электроники, формализован, и соответствующие алгоритмы в совокупности с численными методами интегрирования и сервисными функциями (математические модели) реализованы в виде стандартных сред моделирования [6]. Таким образом, при использовании современных сред задачи моделирования перемещаются в область построения адекватных моделей анализируемых схем и входящих в них элементов.

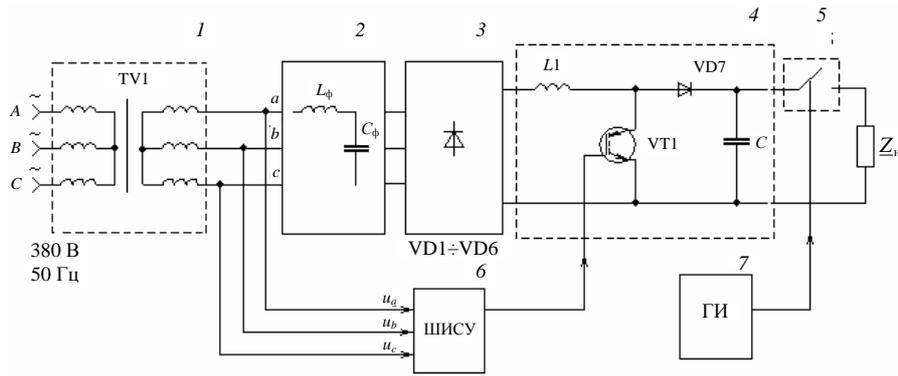


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема источника питания для ПЭО: 1 — силовой трансформатор; 2 — высокочастотный фильтр; 3 — диодный мост; 4 — повышающий регулятор; 5 — силовой ключевой элемент; 6 — широтно-импульсная система управления; 7 — генератор импульсов

Целью представляемой работы является исследование влияния характера нагрузки на режим работы источника питания для плазменно-электролитического оксидирования. Для достижения данной цели с помощью пакета прикладных программ *Matlab* был смоделирован источник питания для проведения процесса ПЭО алюминия. Анализ проводился как для чисто активной нагрузки, так и для модельной нагрузки, построенной по литературным данным [7].

Математическая модель источника питания позволяет отработать оптимальные с точки зрения энергопотребления режимы технологического процесса и может быть использована при разработке автоматизированных систем управления данным процессом.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема источника питания для ПЭО. Источник питания содержит понижающий трехфазный трансформатор 1, высокочастотный фильтр 2, трехфазный диодный мостовой выпрямитель 3, повышающий регулятор 4 и ключевой элемент 5. Источник питания может работать в двух режимах: стабилизированном и импульсном. Регулирование напряжения на нагрузке при работе в стабилизированном режиме осуществляется с помощью повышающего регулятора на основе IGBT транзистора VT1 [8], который управляется широтно-импульсной системой управления 6. При работе в импульсном режиме формирование импульсов напряжения на нагрузке осуществляется с помощью ключевого элемента 5, который управляется дополнительным генератором с широтно-импульсной модуляцией 7.

Принцип работы источника питания, показанного на рис. 1, состоит в следующем. При включении транзистора VT1, ток в дросселе L1 начинает линейно нарастать, пока от системы управления не поступит сигнал на запертие VT1. При выключении транзистора VT1 энергия из дросселя L1 через диод VD7 передается в конденсатор C1 выходного фильтра и нагрузку $Z_{н}$. При этом в процессе размыкания транзистора VT1 на дросселе наводится значительная по величине ЭДС, направленная согласно с напряжением диодного моста 3. В результате напряжение на нагрузке равно сумме напряжений на дросселе L1 и источника питания (диодный мост 3) и больше последнего. Регулирование величины напряжения на нагрузке производится на основе широтно-импульсной модуляции. При этом входной $L_{\phi} C_{\phi}$ -фильтр обеспечивает потребление непрерывного тока из питающей сети с допустимым уровнем искажения за счет высших гармоник от коммутаций с периодом $T_{пер}$ [8]. Особенность схемы заключается в том, что начальные включения транзистора VT1 синхронизируются с моментами естественной коммутации вентилей катодной (VD1,3,5) и анодной (VD2,4,6) групп выпрямительного моста 3.

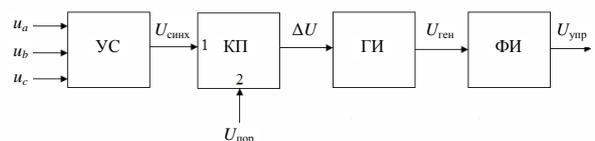


Рис. 2. Структурная схема широтно-импульсной системы управления повышающего регулятора. УС — устройство синхронизации; КП — компаратор; ГИ — генератор импульсов; ФИ — формирователь выходных импульсов

На рис. 2 представлена структурная схема системы управления. Система управления содержит устройство синхронизации (УС), компаратор (КП), генератор прямоугольных импульсов (ГИ), формирователь выходных импульсов (ФИ). Принцип работы системы управления заключается в следующем. Устройство синхронизации (УС) отслеживает моменты естественной коммутации силовых диодов выпрямительного моста 3, сравнивая фазные напряжения вторичной обмотки силового трехфазного трансформатора 1 (см. рис. 1) u_a, u_b, u_c . В случае равенства фазных напряжений, что соответствует моменту естественного отпирания диодов анодной и катодной групп, УС выдает запускающий синхроимпульс $U_{\text{синх}}$ длительностью 120 электрических градусов. Сформированный синхроимпульс подается на вход 1 компаратора (КП). Компаратор, в результате сравнения сигнала, поступившего на вход 1 с некоторым пороговым значением $U_{\text{пор}}$ (вход 2), формирует сигнал ошибки ΔU , который запускает генератор прямоугольных импульсов (ГИ). В результате чего прямоугольные импульсы, формируемые блоком ГИ $U_{\text{ген}}$, поступают на формирователь выходных импульсов (ФИ), представляющий собой драйверное устройство, содержащее все необходимые элементы для управления затвором IGBT транзистора. ФИ обеспечивает необходимые уровни согласования токовых и потенциальных сигналов, длительностей фронтов и задержек, а также необходимые уровни защиты управляемого транзистора при опасных уровнях напряжения насыщения (токовая перегрузка или короткое замыкание) и недостаточном напряжении на затворе. Таким образом, система управления формирует прямоугольные управляющие импульсы требуемой длительности (10–190 мкс), которые через выходной порт ФИ системы управления $U_{\text{упр}}$ подаются на затвор силового транзистора VT1 в течение 120 электрических градусов. Частота следования управляющих импульсов — 5 кГц. Необходимо отметить, что введение синхронизации в систему управления позволяет уменьшить потери в силовом транзисторе VT1 и поддерживать коэффициент сдвига, представляющий собой сдвиг первой гармоники первичного тока относительно кривой первичного напряжения, на уровне порядка единицы в процессе регулирования выходного напряжения, что рекомендовано в работах [8, 9].

Для моделирования источника питания и его широтно-импульсной системы управле-

ния использовалась расширенная библиотека Simulink. Схема модели источника питания для ПЭО представлена на рис. 3, где широтно-импульсная система управления показана в виде блока Control System, схема которой представлена на рис. 4. Приведенная модель силовой части источника и широтно-импульсной системы управления позволяет реализовать требуемый алгоритм управления источником питания, представленный выше.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве нагрузки при моделировании источника питания использовались: активное сопротивление и последовательно-параллельная схема замещения электролизера при ПЭО алюминия (модельная нагрузка), представленная на рис. 5 [7]. Значения сопротивлений и емкости выбирались для характерных моментов обработки: начало (1-я минута) и окончание (60-я минута). Значение полного комплексного сопротивления модельной нагрузки оценивалось на частоте преобразования 5 кГц. Условия, при которых проводилось моделирование для импульсного и стабилизированного режимов работы источника питания сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Варианты нагрузки источника

Моделируемый момент времени обработки, мин	1	60
Активная нагрузка	$R_{н1} = 50 \text{ Ом}$	$R_{н2} = 200 \text{ Ом}$
Модельная нагрузка	$R_1 = 10 \text{ Ом};$ $R_2 = 58 \text{ Ом};$ $C = 0,38 \text{ мкФ}$ $Z_{н1} = 56e^{-j28^\circ} \text{ Ом}$	$R_1 = 11 \text{ Ом};$ $R_2 = 324 \text{ Ом};$ $C = 0,24 \text{ мкФ}$ $Z_{н2} = 127e^{-j62^\circ} \text{ Ом}$

Таблица 2

Временные параметры работы силового транзистора

Режим работы источника	Стабилизированный	Импульсный
Длительность открытого состояния силового транзистора $\tau_{н}$, мкс	10–190	50–190
Период переключения силового транзистора $T_{пер}$, мкс	200	

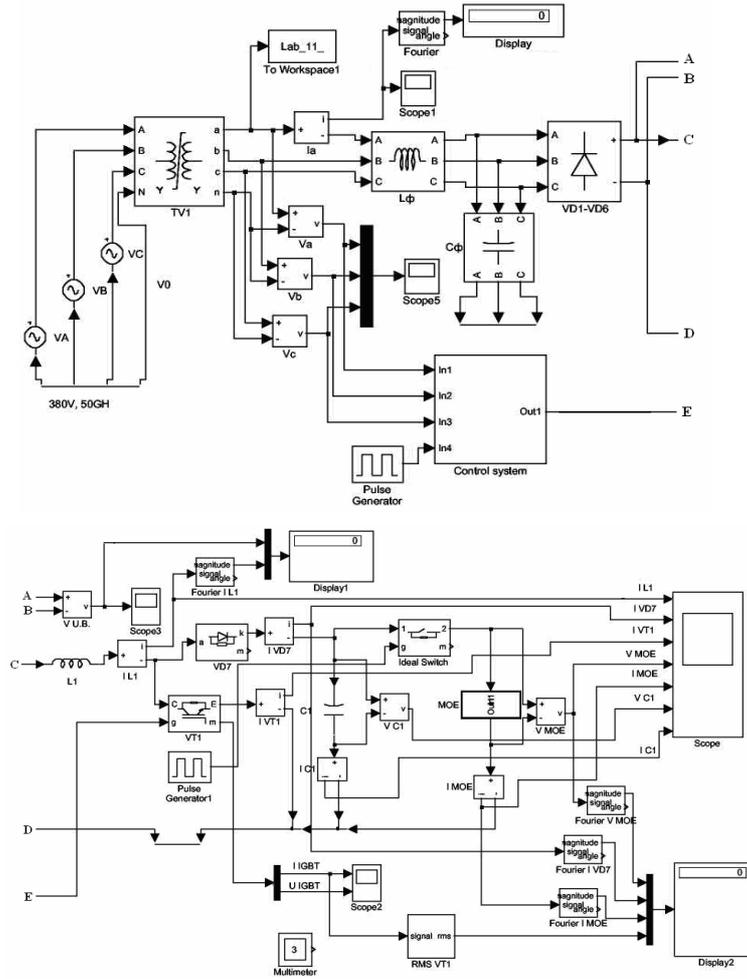


Рис. 3. Схема модели источника питания для ПЭО

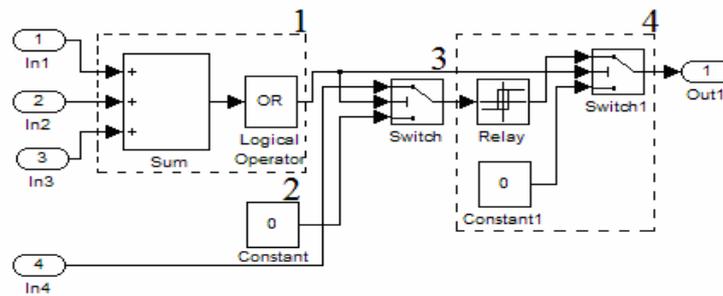


Рис. 4. Схема модели широтно-импульсной системы управления повышающего регулятора: 1 – устройство синхронизации; 2 – задатчик порогового значения; 3 – компаратор; 4 – формирователь выходных импульсов

В результате моделирования были получены временные диаграммы работы модели источника питания на активную и модельную нагрузку для импульсного и стабилизированного режима. На рис. 6–9 представлены указанные диаграммы в масштабе частоты преобразования, на которых показаны кривые токов дросселя (I_{L1}), возвратного диода (I_{VD7}), транзистора (I_{VT1}), нагрузки (I_{MOE}), конден-

сатора выходного фильтра (I_{C1}) и напряжения на нагрузке (V_{MOE}).

На рис. 6 и 7 временные диаграммы представлены для стабилизированного режима работы на активную и модельную нагрузку соответственно. Анализ указанных диаграмм показывает, что при работе источника в данном режиме, характер нагрузки практически не влияет на формы кривых токов и напряжений на элементах схемы, а также на нагруз-

ке источника. При работе источника в стабилизированном режиме на любую из рассмотренных нагрузок, значение тока нагрузки может варьироваться в диапазоне 0 ... 40 А, значение напряжения нагрузки — в диапазоне 400 ... 1200 В.

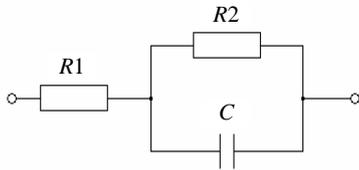


Рис. 5. Последовательно-параллельная схема замещения электролизера при ПЭО алюминия

На рис. 8 и 9 временные диаграммы представлены для работы в импульсном режиме

на активную и модельную нагрузку соответственно. Анализ указанных диаграмм показывает, что при работе источника в данном режиме характер нагрузки влияет незначительно на формы кривых токов и напряжений на элементах схемы источника, а именно: на дросселе L1, транзисторе VT1, диоде VD7, конденсаторе C1. Однако характер нагрузки достаточно сильно влияет на форму кривых тока и напряжения на нагрузке. Так, при работе в импульсном режиме источник питания формирует на активной нагрузке импульсы напряжения и тока прямоугольной формы с длительностью от 50 до 190 мкс с частотой их следования 5 кГц. Данные параметры импульсов рекомендованы для импульсной обработки в работе [1].

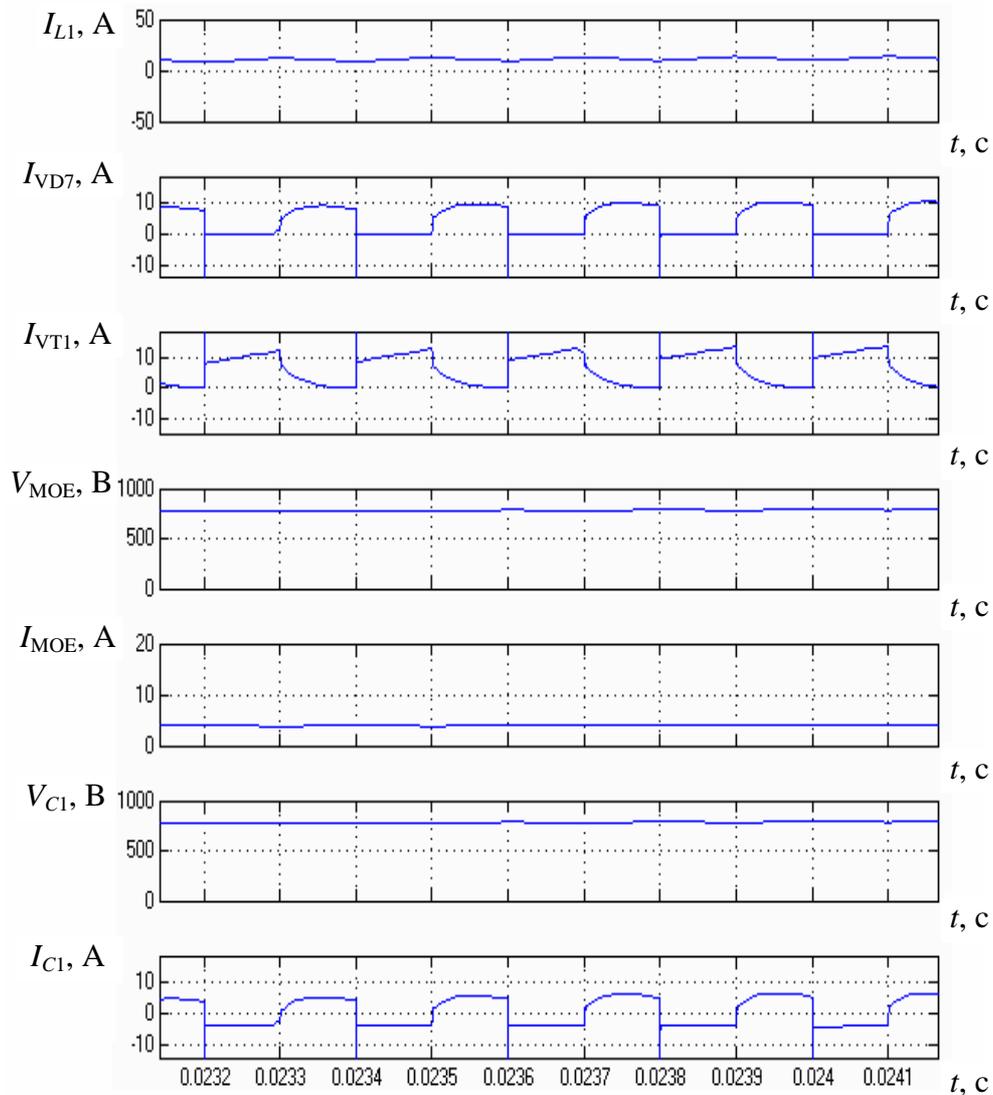


Рис. 6. Временные диаграммы работы модели источника в стабилизированном режиме на активную нагрузку $R_{н2} = 200 \text{ Ом}$

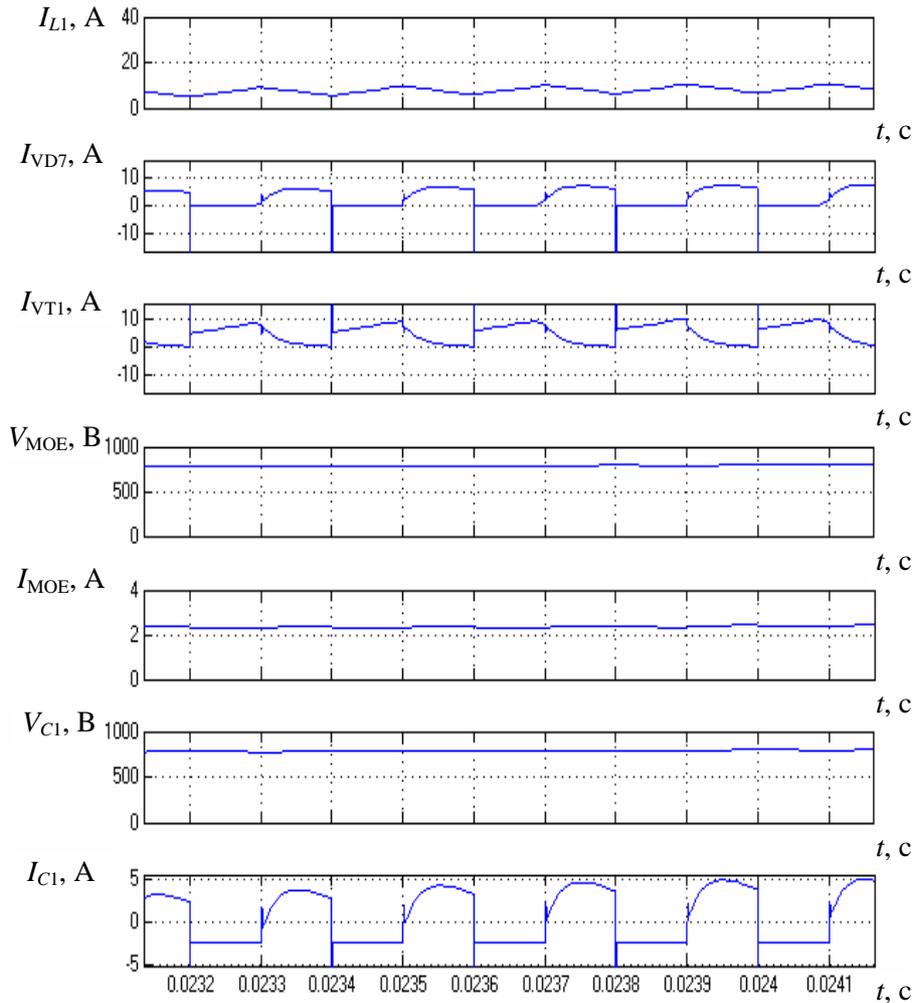


Рис. 7. Временные диаграммы работы модели источника в стабилизированном режиме на модельную нагрузку $Z_{н2} = 127e^{-j62^\circ}$ Ом

При работе источника питания на модельную нагрузку форма импульсов напряжения и тока нагрузки отличается от прямоугольной. Затягивание спада импульса напряжения на нагрузке ($V_{МОЕ}$) связано с наличием емкости в цепи нагрузки. Наличием емкости в цепи нагрузки также объясняются скачки импульсов тока нагрузки ($I_{МОЕ}$), возникающие при периодическом подключении цепи нагрузки к источнику питания.

Приведенный анализ временных диаграмм токов и напряжений на наиболее ответственных элементах электрической схемы указывает на рациональность ее построения и возможность построения современных источников для ПЭО по предложенной схеме.

Результаты моделирования сведены в табл. 3 и 4. Данные таблицы показывают зависимость следующих основных параметров источника питания от характера нагрузки:

- скважность импульсов

$$Q = \frac{\tau_{и}}{T_{пер}}, \quad (1)$$

- относительное выходное напряжение

$$U_{вых}^* = \frac{U_{вых.рег.}}{U_{вых.d}}, \quad (2)$$

- коэффициент мощности

$$K_{МН} = \frac{I_{\Sigma}}{I_{(1)}}; \quad (3)$$

где $\tau_{и}$ — длительность открытого состояния ключевого элемента, $T_{пер}$ — период его переключения, $U_{вых.рег.}$ — выходное напряжение вольтоповышающего регулятора, $U_{вых.d}$ — выходное напряжение мостового выпрямителя, I_{Σ} — действующее значение тока всех высших гармоник, $I_{(1)}$ — действующее значение тока первой гармоники [9].

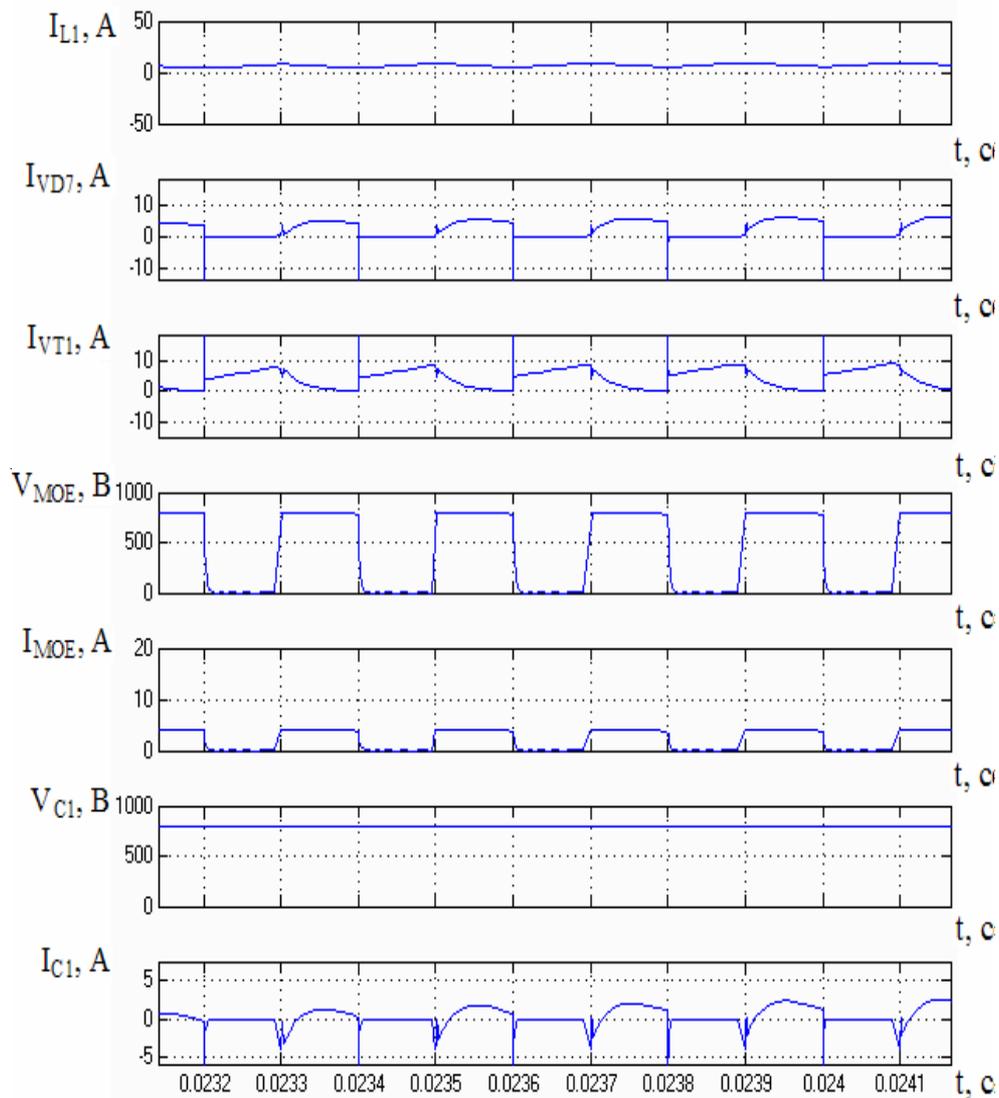


Рис. 8. Временные диаграммы работы модели источника в импульсном режиме на активную нагрузку $R_{H2} = 200 \text{ Ом}$

Таблица 3

Основные параметры источника питания при работе в стабилизированном режиме

Параметр источника	Характер нагрузки											
	Активная $\frac{R_{H1}}{R_{H2}}$						Модельная $\frac{Z_{H1}}{Z_{H2}}$					
Q	0,05	0,2	0,4	0,5	0,7	0,95	0,05	0,2	0,4	0,5	0,7	0,95
$U_{\text{вых}}^*$	1	1,19	1,59	1,93	3,19	11,6	1	1,2	1,59	1,92	3,23	12,3
K_{MH}	0,99	0,99	0,99	0,98	0,95	0,92	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,96
	0,99	0,99	0,98	0,98	0,92	0,92	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,96

Таблица 4

Основные параметры источника питания при работе в импульсном режиме

Параметр источника	Характер нагрузки									
	Активная $\frac{R_{H1}}{R_{H2}}$					Модельная $\frac{Z_{H1}}{Z_{H2}}$				
Q	0,5	0,65	0,8	0,95	0,25	0,35	0,5	0,65	0,8	0,95
$U_{\text{вых}}^*$	1,01	1,12	0,57	1,83	1,16	1,31	1,53	1,71	1,85	1,93
K_{MH}	0,96	0,97	0,99	0,99	0,92	0,95	0,94	0,98	0,96	0,95
	0,96	0,97	0,98	0,99	0,97	0,97	0,95	0,95	0,95	0,94

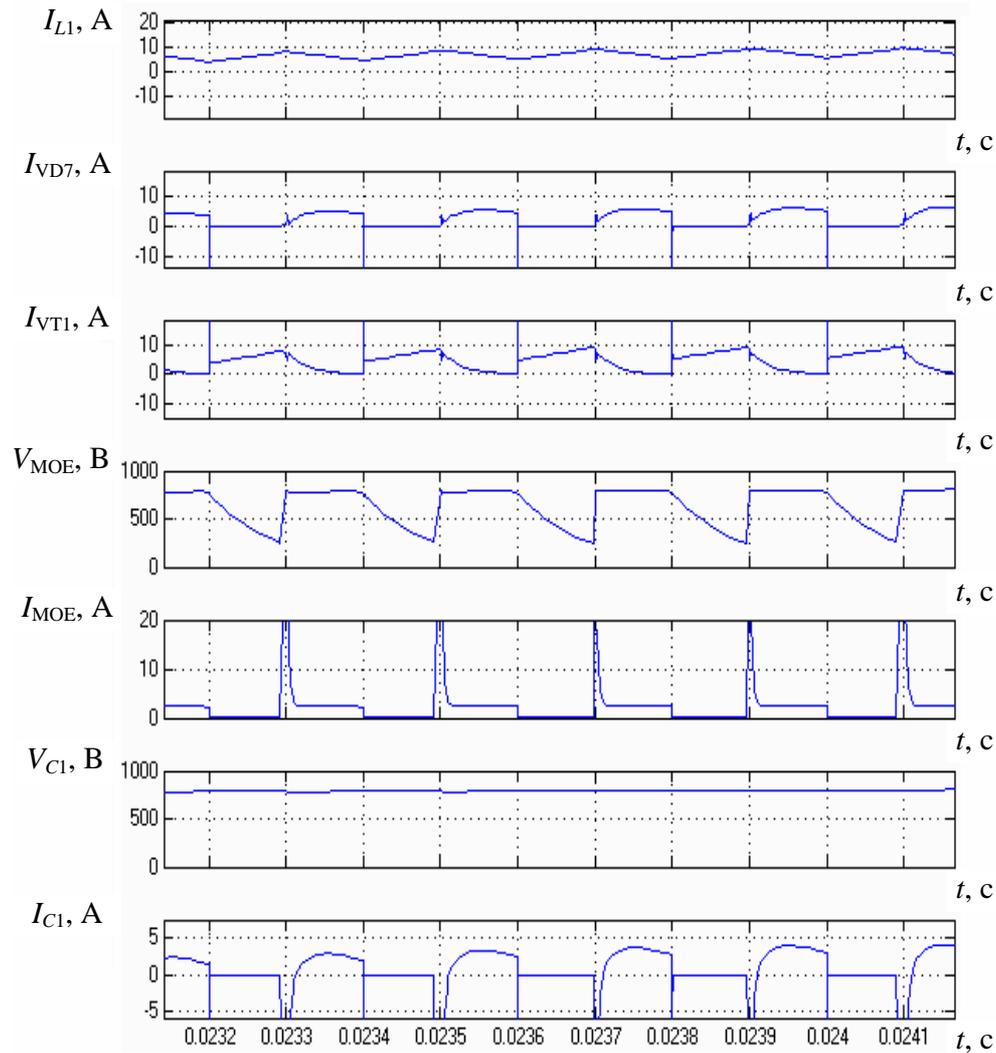


Рис. 9. Временные диаграммы работы модели источника в импульсном режиме на модельную нагрузку $Z_{н2} = 127e^{-j62^\circ}$ Ом

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [8,9], на основе данных табл. 3 и 4 были получены основные регулировочные характеристики (рис. 10, 11): зависимости относительного выходного напряжения источника $U_{\text{ВЫХ}}^*$ от скважности включения силового транзистора Q . Регулировочная характеристика позволяет оценить эксплуатационные показатели преобразователя, основными из которых являются: относительное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}^*$, коэффициент мощности $K_{\text{МН}}$, коэффициент полезного действия η , выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$. Регулировочные характеристики также позволяют определить диапазон регулирования скважности ΔQ при котором источник питания обладает требуемыми значениями $U_{\text{ВЫХ}}^*$, $K_{\text{МН}}$, η , $P_{\text{ВЫХ}}$.

На рис. 10 представлены регулировочные характеристики источника питания при его работе в стабилизированном (кривые 1, 2) и в импульсном режимах (кривые 3, 4) для активной нагрузки. Анализ полученных характеристик показывает, что для всего диапазона регулирования скважности ΔQ (от 0 до 1) величина $U_{\text{ВЫХ}}^*$ для стабилизированного режима почти в 1,6 раз больше, чем для импульсного режима.

На рис. 11 представлены регулировочные характеристики источника питания при его работе в стабилизированном (кривые 1, 2) и в импульсном режимах (кривые 3, 4) для модельной нагрузки. Анализ полученных характеристик показывает, что для всего диапазона регулирования скважности ΔQ (от 0 до 1) величина $U_{\text{ВЫХ}}^*$ для стабилизированного режима в 1,25 раз больше чем для импульсного режима.

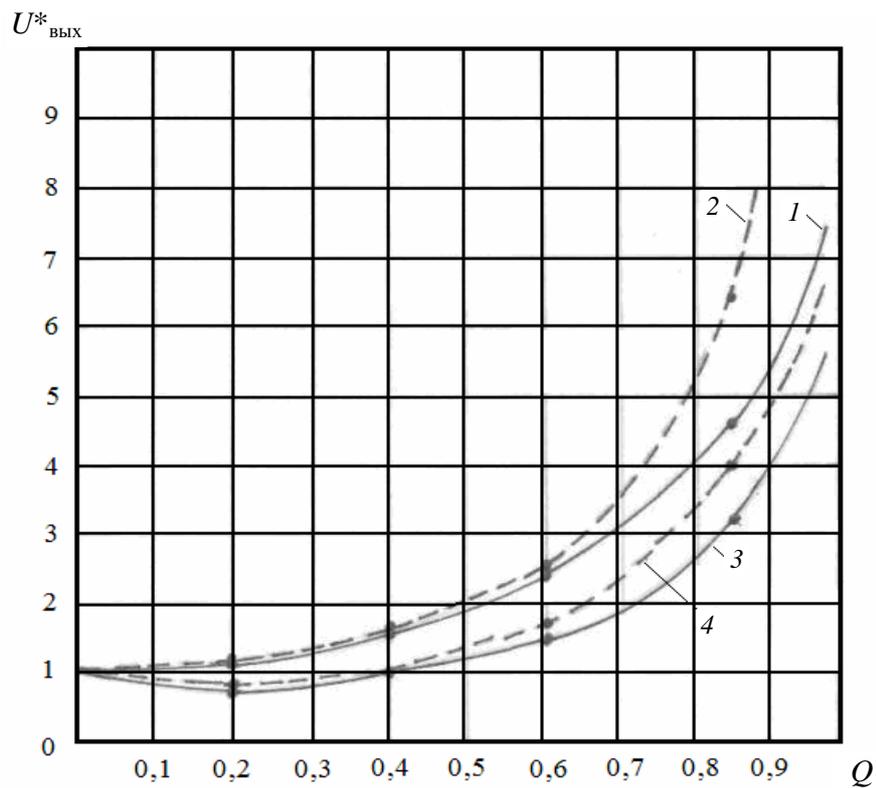


Рис. 10. Регулировочные характеристики источника питания в режимах: 1, 2 – стабилизации; 3, 4 – импульсном для активной нагрузки: 1, 3 – 50 Ом; 2, 4 – 200 Ом

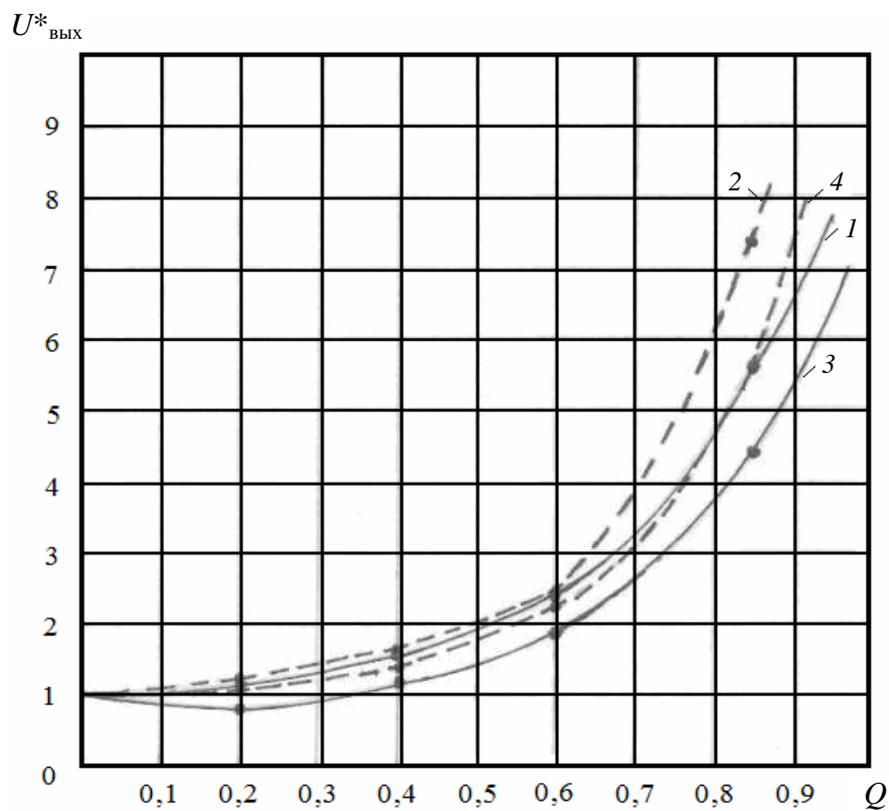


Рис. 11. Регулировочные характеристики источника питания в режимах: 1, 2 – стабилизации; 3, 4 – импульсном для модельной нагрузки: 1, 3 – $Z_{н1} = 56e^{-j28^\circ}$ Ом; 2, 4 – $Z_{н2} = 127e^{-j62^\circ}$ Ом

Из анализа регулировочных характеристик следует, что источник питания, работающий в стабилизированном режиме, обладает более широким диапазоном регулирования по сравнению с импульсным, вне зависимости от характера нагрузки. Уменьшение диапазона регулирования при импульсном режиме работы связано с дополнительными коммутационными процессами в силовом ключевом элементе 5 при его переключениях на нагрузку.

Необходимо отметить, что смоделированный источник питания для ПЭО обладает высоким значением коэффициента мощности в достаточно широком диапазоне регулирования скважности. Так, анализ данных табл. 3 показывает, что в диапазоне регулирования скважности от 0,05 до 0,95 коэффициент мощности в режиме стабилизации лежит в пределах 0,92 ... 0,99 для активной нагрузки и 0,96 ... 0,99 — для модельной нагрузки. Анализ данных табл. 4 показывает, что в диапазоне регулирования скважности от 0,5 до 0,95 коэффициент мощности в импульсном режиме лежит в пределах 0,96 ... 0,99 для активной нагрузки; и 0,94 ... 0,97 — для модельной нагрузки. Полученные в результате моделирования данные о коэффициенте мощности говорят о качественном использовании источником питания потребляемой электроэнергии при изменении нагрузки в процессе обработки.

ВЫВОДЫ

Из результатов математического моделирования процессов в источнике питания для ПЭО видно, что при работе источника питания в стабилизированном режиме характер нагрузки практически не влияет на формы кривых токов и напряжений на ответственных силовых элементах схемы, а также на нагрузку источника. Поэтому регулирование напряжения на нагрузке до требуемых значений обеспечивается в широком диапазоне регулирования скважности ΔQ от 0,05 до 0,95. При работе источника питания в импульсном режиме характер нагрузки влияет незначительно на формы кривых тока и напряжения на элементах схемы источника. Однако характер нагрузки достаточно сильно влияет на форму кривых тока и напряжения на нагрузке. Регулирование напряжения на нагрузке до требуемых значений обеспечивается в более узком, по сравнению со стабилизированным режимом, диапазоне регулирования скважности ΔQ от 0,50 до 0,95. При переключении

ях силового ключевого элемента, работающего на сложную нагрузку, возникают дополнительные коммутационные процессы, приводящие к уменьшению диапазона регулирования. Режим работы и характер нагрузки существенно влияют на коэффициент мощности источника питания, что связано с применением в его схеме активного корректора коэффициента мощности на основе синхронизированного вольтоповышающего регулятора с ШИМ. Проведенный анализ указывает на рациональность построения предлагаемой схемы источника питания и возможность создания современных источников для ПЭО по рассмотренной схеме. Таким образом, проведенное моделирование электрических процессов в источнике питания для ПЭО проясняет влияние характера нагрузки на регулировочные и энергетические характеристики источника, которое должно учитываться при проектировании технологических установок для проведения процесса плазменно-электролитического оксидирования. В качестве рекомендаций по возможному использованию результатов работы следует отметить, что на основании полученной математической модели целесообразно построение адаптивной системы управления процессом электролитно-плазменной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yerokhin, A. L.** Plasma electrolysis for surface engineering. Review / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. J. Dowey // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 122. P. 73–79.
2. **Гордиенко, П. С.** Микродуговое оксидирование титана и его сплавов / П. С. Гордиенко, С. В. Гнеденков. М.: Наука, 1997. 185 с.
3. **Суминов, И. В.** Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин. М.: Экомет, 2005. 368 с.
4. **Баковец, В. В.** Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В. В. Баковец, О. В. Поляков, И. П. Долговесова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. 164 с.
5. **Черненко, В. И.** Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В. И. Черненко, Л. А. Снежко, И. И. Папанова. Л.: Химия, 1991. 128 с.
6. **Черных, И. В.** SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.
7. **Parfenov, E. V.** Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process / E. V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201. P. 8661–8670.

8. **Зиновьев, Г. С.** Основы силовой электроники / Г. С. Зиновьев. Новосибирск : НГТУ, 2003.
9. **Зиновьев, Г. С.** Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей / Г. С. Зиновьев. Новосибирск : НГТУ, 1990. 220 с.

ОБ АВТОРАХ



Лазарев Денис Михайлович, асс. каф. теор. осн. электротехн. (филиал в Кумертау). Дипл. инж. по авиац. прибор. и изм.-выч. компл. (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. моделир. источн. питания для электротехнол. установок.



Фаткуллин Азамат Раисович, преп.-стаж. каф. теор. осн. электротехн. Дипл. инж. по авиац. прибор. и изм.-выч. компл. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. источ. пит. для микродугового оксидирования.



Парфенов Евгений Владимирович, доц. той же каф. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по автом. и упр. технол. проц. и произв. (там же, 2002). Иссл. в обл. интел. упр. технол. проц.



Даутов Анвар Ибрагимович, дир. Кумерт. фил. УГАТУ. Дипл. инж. электрон. техн. (Электротехн. ин-т нефти, 1972). Канд. техн. наук по теор. осн. теплотехн. (Казанск. хим.-техн. ин-т, 1977). Иссл. в обл. теплотехн. и теплофиз.