

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ИСТОЧНИКА ТОКА НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

*Ускенбаев Д.Е., PhD, ассоциированный профессор
Мендыбаев С.А., к.т.н., доцент
Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,
пр. Жеңіс, 62, г. Нур-Султан, Казахстан, usdan@mail.ru*

Аннотация

В статье приведены результаты исследования математической модели переходных режимов источника питания с естественной токовой характеристикой, применение которого наиболее целесообразно для энергоемких потребителей электротехнологии (дуговые сталеплавильные печи, вакуумные дуговые печи, электролиз цветных металлов и т.д.) которые имеют нелинейную вольт-амперную характеристику и малое дифференциальное сопротивление; применение источника тока обеспечивает стабилизацию рабочего тока, приводит к заметному улучшению технологических показателей, существенно снижает расход энергии, повышает показатели потребляемой из сети электрической энергии (коэффициент мощности, к.п.д., коэффициент гармоник и т.д.); качество регулирования мощности зависит от согласования вольт-амперных характеристик потребителя и источника; в оптимальном случае они должны быть противоположными, что обуславливает необходимость применения для питания потребителей с малым дифференциальным сопротивлением источника тока, динамика которого рассмотрена в работе.

Ключевые слова: ток, напряжение, интегратор, сумматор, инвертор, сигнал, математическая модель, анализ

Введение

Современный этап промышленного производства предъявляет все возрастающие требования к источникам и преобразователям электрической энергии по надежности и экономичности. Производство и распределение электрической энергии в основном осуществляется на переменном

токе при частоте 50 Гц. В то же время более 30% производимой электроэнергии потребляется на постоянном токе. Для преобразования переменного тока в постоянный повсеместно используются полупроводниковые преобразователи. В качестве источников питания различного типа электротермических и

электротехнологических установок (дуговые сталеплавильные, вакуумные дуговые печи, электролиз цветных металлов и др.) представляющих собой наиболее энергоемкую группу потребителей, широко применяются полупроводниковые преобразователи с характеристиками источников тока, получившие название токовые преобразователи.

1) Для целого ряда потребителей постоянного тока (электролиз цветных металлов и химических элементов, гальванопластика, зарядка аккумуляторных батарей, электродуговые печи постоянного тока, электрическая сварка постоянным током, плазматроны и др.) требуется стабилизация и регулирование питающего тока. Эти потребители имеют нелинейную вольтамперную характеристику и малое дифференциальное сопротивление. При исследовании электромагнитных процессов эти потребители могут быть представлены нагрузкой, в виде противо - ЭДС.

Качество регулирования мощности, передаваемой от источника к потребителю, зависит от согласования их вольтамперных характеристик. В оптимальном случае источник и потребитель должны иметь "противоположные" характеристики. Следовательно, для питания потребителей с малым дифференциальным сопротивлением необходим источник тока.

Исследуемый источник тока представляют собой резонансную схему в которой система переменных напряжений преобразуется в систему переменных токов. Схема замещения трехфазно - однофазного источника тока и структура его математической модели приведены на рисунках (7, 8). Работа исследуемого источника тока в статистических режимах изучена довольно широко [1 - 5], однако характер протекания переходных процессов в нем исследован недостаточно. Поэтому возникла необходимость в исследовании его динамики, что обуславливает актуальность данной работы.

В настоящее время известен ряд преобразователей с характеристиками источников тока:

- магнитотирсторные преобразователи (МТП), использующие в качестве составных элементов дроссели насыщения с разделенными рабочими обмотками [4]. Они позволяют осуществить управление режимами работы по силовой цепи. Ток нагрузки определяется только током управления и не зависит при работе на линейном участке от напряжения, частоты сети и сопротивления нагрузки;

- преобразователи с дозированной передачей энергии из сети в нагрузку, использующие явление перезарядки конденсатора, включенного в диагональ тиристорного моста [5]. Наилучшим образом такие преобразователи могут

использоваться в режиме параметрической стабилизации тока при работе на нагрузку с крутопадающей внешней характеристикой;

- асинхронные генераторы (АГ) с конденсаторным возбуждением работающие в режиме источника тока [5];

- вентильно - емкостные преобразователи, представляющие собой диодно - конденсаторные схемы, работающие в режиме близком к короткому замыканию цепи нагрузки [6];

- управляемые вентильные преобразователи, в которых характеристики источника тока формируются за счет отрицательной обратной связи по току. Постоянство тока в этом случае обеспечивается регулированием величины выходного напряжения преобразователя [6]. Управляемые вентильные преобразователи, построенные на базе замкнутых систем стабилизации тока, до настоящего времени нашли широкое практическое применение (ТВ9, ВАК, ВАКР и др.), так как позволяют регулировать величину тока нагрузки в широких пределах обеспечивают сравнительно высокую надежность.

Однако, наряду с этим данные преобразователи обладают рядом недостатков: сложность схемных решений; повышенными требованиями к устойчивости; отрицательным влиянием на питающую сеть. Так как рабочее напряжение энергоемких потребителей меняется в широких пределах, коэффициент сдвига

таких преобразовательных агрегатов оказывается ниже номинальной величины. Кроме того, остается несогласованность динамических ВАХ источника и приемника. Это приводит к значительным пульсациям выпрямленного тока, особенно при углах регулирования близких к девяносто градусам;

- преобразователи с естественной токовой характеристикой. Эти обладают рядом существенных достоинств по сравнению с вентильными преобразователями с обратной связью по току, основными из которых являются : высокий коэффициент мощности во всем диапазоне выходных напряжений; устойчивость к частым коротким замыканиям (режим, характерный для электродуговых технологических процессов); возможность параллельной работы группы токовых преобразователей на общую нагрузку, что позволяет создавать источники тока практически любой мощности с высокой надежностью; уменьшение коэффициента гармоник потребляемого сетевого тока по сравнению с традиционными преобразователями напряжения.

Применение источников тока для электротехнологических потребителей позволяет обеспечить стабилизацию рабочего тока, приводит к улучшению многих показателей. Так, например, в дуговых сталеплавильных печах, характеризующихся большими рабочими токами, применение источников тока обеспечивает

устойчивость питания при технологических коротких замыканиях, что существенно снижает расход металла на плавку, устраняет влияние "короткой сети", повышает показатели потребляемой из сети электроэнергии ($\cos\phi$, к.п.д., коэффициент гармоник) [3, 4].

В вакуумных дуговых печах существенно повышается качество переплавляемых слитков, повышается взрывобезопасность печей. В электронно-лучевых установках применение источников тока устраняет возможность самостоятельного разряда в пространстве между анодом и катодом, что существенно повышает производительность установок и не нарушает непрерывности технологического процесса [3, 4].

В электролизных установках и установках размерной электрохимической обработки появляется возможность повысить производительность технологического процесса, так она прямо пропорциональна току. Кроме электротермических установок перспективно применение источников стабилизированного постоянного тока для электропривода (электропривода с моментными характеристиками) [3, 4].

Результаты и обсуждение

Одним из путей решения поставленной задачи является применение преобразователей с естественной токовой внешней характеристикой, которые по сравнению с традиционными видами преобразователей имеют характеристики источника, полупроводниковых преобразователей с характеристиками источника, имеют коэффициент мощности

Все более широкое применение в последнее время источники тока находят в импульсной электроэнергетике (заряд емкостных накопителей) и ряде других областей промышленности, позволяя повысить эффективность использования электрической энергии, что обуславливает значительный экономический эффект.

Существующие полупроводниковые преобразователи с характеристиками источников тока наряду с существенными достоинствами имеют низкий коэффициент мощности, особенно при глубоком регулировании. Поскольку применение тиристорных устройств приводит к ухудшению качества электроэнергии в промышленных электрических сетях, создание высокоэффективных и надежных источников тока, является важной и необходимой задачей.

В связи с этим, целью работы является исследование электромагнитных процессов в источнике тока при различных добротностях, параметрах резонансного контура и получение осциллограмм выходного тока в переходных режимах.

близкий к единице. В области этих преобразователей проведены и исследованы разнообразные схемы токовых преобразователей, предназначенные для питания различных потребителей [3, 4]. Однако эти исследования приводили к частным результатам, не раскрывающим особенностей преобразователей с естественной токовой характеристикой.

Вместе с тем, исследования были основаны на методах, применяемых для традиционных выпрямителей, что создало дополнительные затруднения из-за высокого порядка дифференциальных уравнений. При анализе электромагнитных процессов неуправляемых токовых преобразователей с естественной токовой характеристикой. при работе на противо - ЭДС и противо - ЭДС с индуктивностью, не рассмотрен характер электромагнитных процессов в динамике при широтном регулировании выходного тока преобразователя.

Источник тока переходные процессы которого исследуется в данной статье образуют самостоятельный класс - класс преобразователей тока в отличие от традиционных схем, которые являются преобразователями напряжения. Для преобразователей напряжения первичным источником служит сеть переменного тока с низким выходным сопротивлением.

Для токовых преобразователей первичным источником является источник тока, имеющий высокое выходное

сопротивление на частоте сети. Новый класс схем потребовал новых методов исследований, новых принципов управления, синтеза новых структур.

Исследуемый источник тока представляют собой резонансную схему в которой система переменных напряжений преобразуется в систему переменных токов. Схема замещения трехфазно - однофазного источника тока и структура его математической модели приведены на рисунках 1. Работа исследуемого источника тока в статистических режимах изучена довольно широко [5, 6], однако характер протекания переходных процессов в нем исследован недостаточно.

Анализируемый источник тока относится к техническим устройствам больших мощностей, синтез которых представляет собой сложную задачу [6-8]. Процесс этот трудоемкий и требует значительнее материальных затрат. Помимо этого возникают трудности для проведения универсального эксперимента, в ходе которого варьируются и выбираются основные параметры технической схемы. Физическое моделирование не позволяет исследовать необходимые режимы при изменении реактивных параметров в широких пределах; не обеспечивает учета нелинейностей, особенно при аварийных режимах и др. [8, 9] В связи с этим возникла необходимость математического моделирования. Анализ силовых схем с помощью математических моделей позволяет существенно

сократить объем, исследований по сравнению с физическим моделированием, обеспечивает возможность просмотра большого количества вариантов, интересных для анализа объекта.

С этой целью была построена математическая модель (рисунок 2) с учетом характерных особенностей источника (коммутация только нулевых значений выходного тока). Нагрузка менялась: от $Z_H = 0$ (короткозамкнутый режим) до $Z_H = Z_{H \text{ ном}}$ (номинальный режим), при различных значениях

Электромагнитные процессы в параметрическом источнике, описываются следующей системой уравнений :

$$L \cdot di/dt = U_C - U_{BC} - i_L \cdot R_L$$

$$i_C = -i_L - i_H(1)$$

$$i_C = C \cdot dU_C/dt$$

$$L_H \cdot di_H/dt + i_H \cdot (R_H + r_{TP}) = U_C + U_{CA} = U_I$$

Структурная схема математической модели параметрического источника, реализующая систему уравнений (1), приведена на рисунке 2. Усилители 1, 2, 3 представляют собой модель колебательного звена, настроенного на частоту сети, в котором имеются два контура отрицательной обратной связи:

- контур, связанный с добротностью дросселя;

добротностях Q резонансного контура параметрического источника ($Q = \omega L/R_L$). На схеме замещения (рисунок 1), обозначено: R_H – сопротивление нагрузки; r_{TP} – активное сопротивление трансформатора; L_{TP} – индуктивность рассеяния трансформатора; R_L – активное сопротивление дросселя параметрического источника; i_H , i_L , i_C – токи через R_H , L , C ; U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – линейные напряжения питающей сети.

- контур, моделирующий нагрузку.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты решения (осциллограммы тока параметрического источника), полученные на математической модели при различных значениях величины нагрузки, добротности резонансного контура источника и отклонений емкости параметрического источника от резонансного значения.

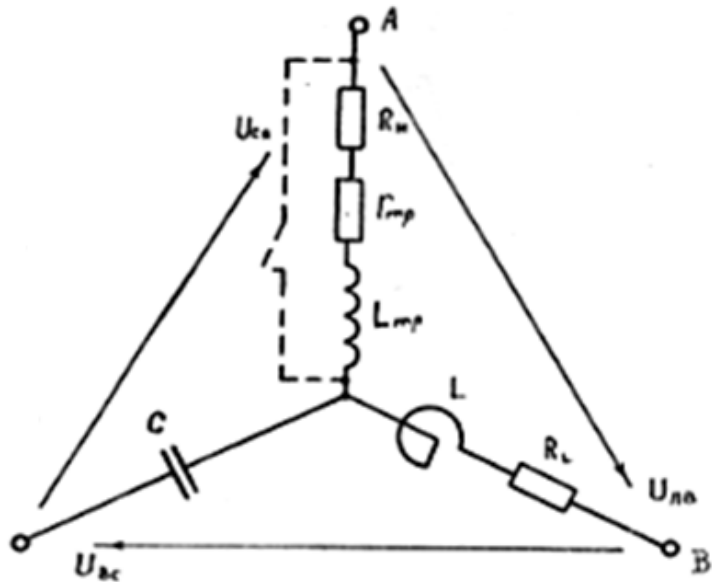


Рисунок 1 - Схема замещения трехфазного параметрического источника тока

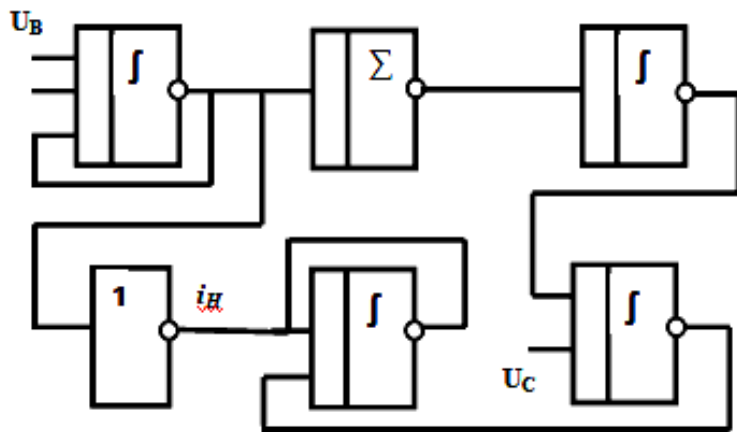


Рисунок 2 - Схема математической модели

На рисунках 3 и 4 обозначено: i_A - ток фазы A; t_o - момент времени, соответствующий изменению нагрузки с $R_H = 0.5 R_{H \text{ ном}}$ до $R_H = 0$ (короткозамкнутый

режим нагрузки); t_3 - момент времени соответствующий окончанию короткого замыкания нагрузки.

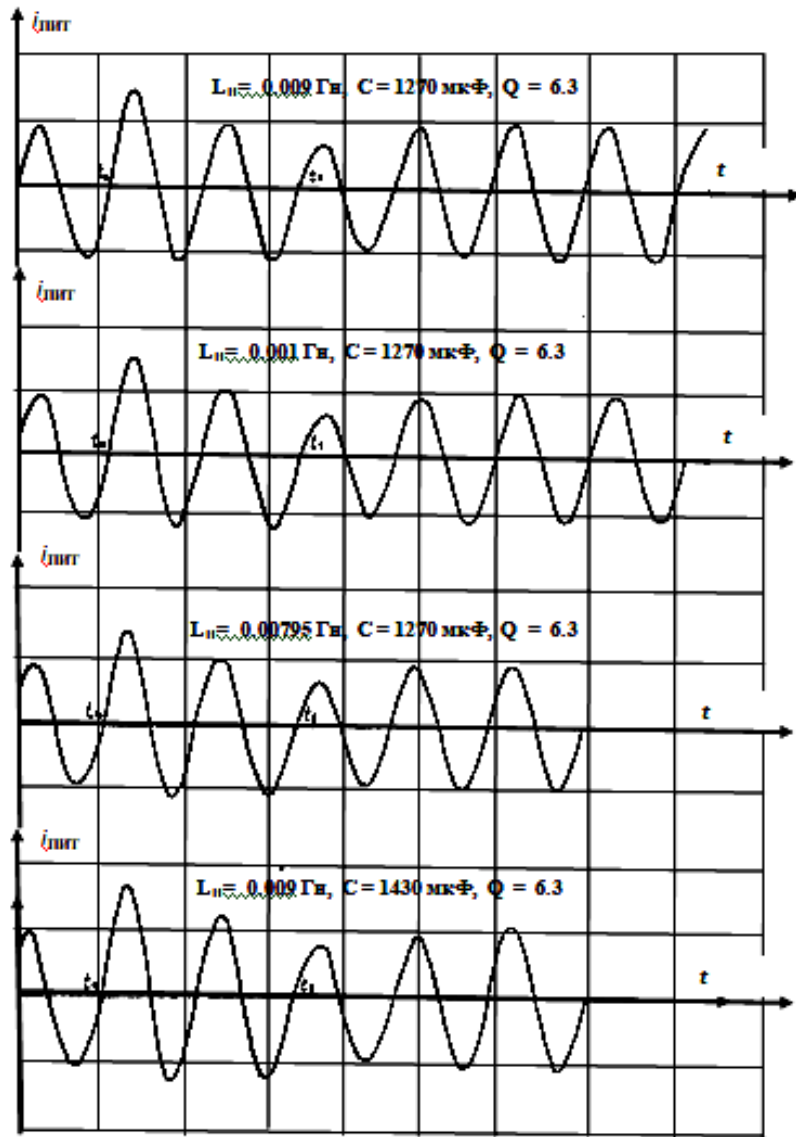


Рисунок 3 - Осциллограммы тока ПИТ при различных добротностях и параметрах резонансного контура

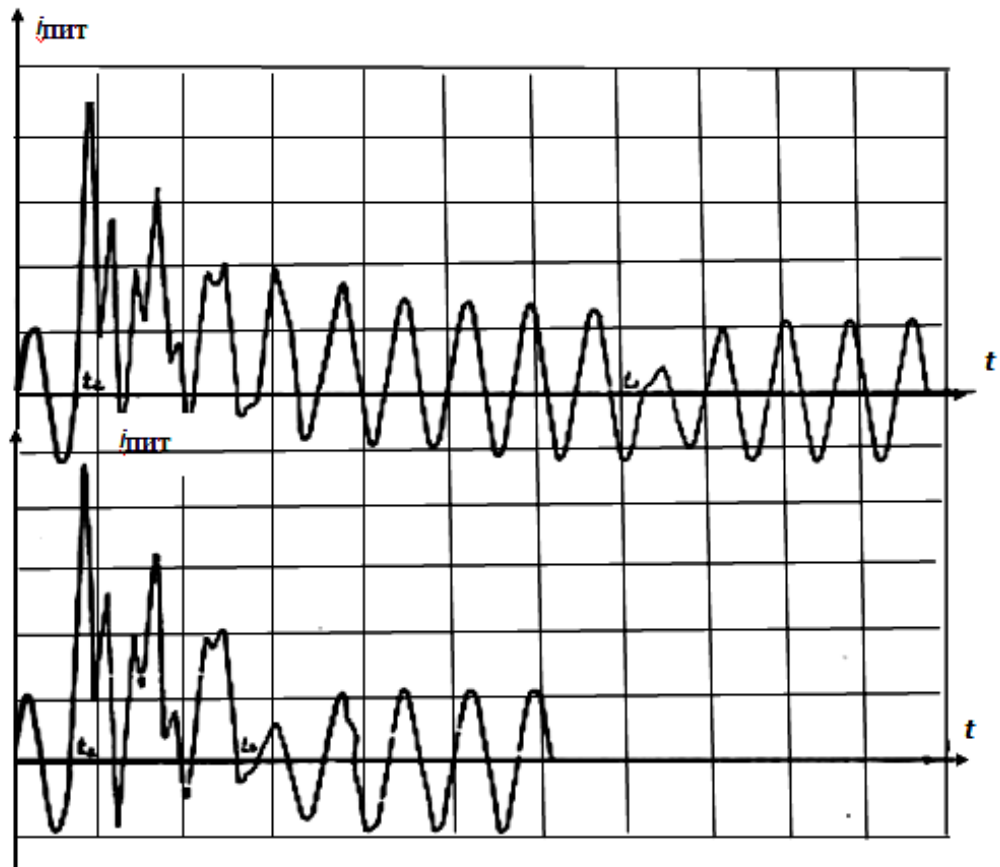


Рисунок 4 - Осциллограммы тока ПИТ в переходных режимах

В результате исследования переходных процессов источника тока можно сказать стелующе:

1) При $(R_H + r_{TP}) \gg R_L$ изменение добротности в широких пределах не влияет на переходный процесс при коммутациях нагрузки.

2) При замыкании нагрузки, в начальный момент появляются значительные броски токов, вследствие ненулевых начальных условий переключения. Ненулевые начальные условия возникают ввиду того, что в момент перехода к режиму короткого замыкания (момент времени t_2 , рисунок 3.4), когда кривая фазного тока ПИТ проходит через ноль, а напряжение на емкости источника отлично от нуля. Происходит разряд емкости по образовавшейся

короткозамкнутой цепи. Причем во время переходного процесса возникают колебания, частота которых определяется контуром, образованным емкостью параметрического источника тока и индуктивностью рассеяния трансформатора.

Время переходного процесса определяется коэффициентом демпфирования, который зависит от величины суммарного активного сопротивления $R = r_{TP} + r_{СП} + r_B$, где r_{TP} - сопротивление трансформатора; $r_{СП}$ - сопротивление соединительных проводов, r_B - сопротивление вентиля. Так как величина суммарного сопротивления незначительна, время затухания в сильноточных схемах составляет 5 - 6 периодов сети (рисунок 4).

При переходе от короткого замыкания к нагрузочному режиму, момент времени t_3 на рисунке 3.4, выходной ток ПИТ достигает

своего установившегося значения в течении времени $t \approx 1,5 \cdot T_{\text{СЕТИ}}$.

3) Длительность переходного процесса T_{Π} , при выполнении условий:

$$R_H \gg R_L, R_H \gg r_{TP}$$

можно с достаточной степенью точностью оценить постоянной времени равной :

$$T_{\Pi} = L / (R_H + L_{TP}) = 1 / \omega \cdot X / R_H = T_C / 2 \pi \cdot X / R_H, (2)$$

где T_C - период сети; $X = \omega L = 1 / \omega C$ - реактивные сопротивления элементов резонансного контура параметрического источника.

$$T_{\Pi} / T_C = 1 / 2 \pi \cdot X / R_H \quad (3)$$

4) При отклонениях емкости C параметрического источника тока от своего резонансного значения, коэффициент демпфирования контура нагрузки меняется в C / C_I раз, также меняется и время переходного процесса равно:

$$T_{\Pi I} = T_{\Pi} \cdot C / C_I (4)$$

5) Контур, состоящий из усилителей (рисунок 2) является моделью звена второго порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = T_1 \cdot p / 1 / (\omega_{\Pi}^2 + 2\xi / \omega_{\Pi} \cdot p + 1) = T_1 \cdot p / (T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot p + 1), (5)$$

где $T_1 = L_{TP} / (L_{TP} + R_H)$, $T_2 = C / (r_{TP} + R_H)$ – постоянные времени; $\omega_{\Pi} = \sqrt{1 / (T_1 \cdot T_2)}$ – угловая частота свободных колебаний; $\xi = 1/2 \cdot \omega_{\Pi} \cdot T_2 = \sqrt{T_2 / 4T_1}$ – коэффициент демпфирования.

Так как $L_{TP} \ll L$, то можно считать, что постоянная времени на переходной процесс не влияет. Тогда скачкообразное изменение сопротивления нагрузки будет создавать такое же воздействие как и ступенчатое возмущение на входе звена второго порядка.

6) В зависимости от соотношений T_1 и T_2 переходной процесс будет аperiodическим или колебательным. Условие аperiodического переходного процесса записывается:

$$\xi \geq 1 \Rightarrow T_2 / T_1 \geq 4 \quad (6)$$

$$(r_{TP} + R_H)^2 \cdot C / L_{TP} \geq 4$$

$$(r_{TP} + R_H) \geq 2 \cdot \sqrt{C / L_{TP}} \quad (7)$$

$$\xi \geq \sqrt{2} / 2$$

колебательный характер переходного процесса незаметен и переходной процесс становится близким к апериодическому.

Условие колебательного переходного процесса записывается :

$$\xi \geq \sqrt{2} / 2 = 0,707 \quad (8)$$

$$(R_H + r_{TP}) \ll 2 \cdot \sqrt{C / L_{TP}}$$

$$\omega = \omega_{II} \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

Исследуемый в работе источник питания имеет естественную токовую характеристику, что обеспечивает стабилизацию рабочего тока и обуславливает целесообразность

его использования в электротермических установках, вакуумных дуговых печах, электролизе цветных металлов и др., т.е для применения в силовых потребителях.

Заключение

В статье разработана математическая модель источника тока в переходных режимах с учетом специфических особенностей источника (коммутация только нулевых значений выходного тока). Исследуемый источник тока является резонансной схемой, преобразующей систему переменных ЭДС в систему переменных токов. Рассмотрена

схема замещения трехфазно - однофазного источника тока и структура его математической модели. Анализируемый источник тока относится к техническим устройствам большой мощности. Проведенные в работе результаты исследования переходных режимов может быть использованы при практическом проектировании источников питания для наиболее

энергоёмких электротехнологических потребителей.

Список литературы

1. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. - Монография. Издательство НГТУ, М. 2015. – С. 664.
2. Китаев Ю.В. Основы цифровой техники. - Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО. - 2007. – С. 87 - 89.

3. Zinoviev G.S. Fundamentals of Power Electronics. - Monogr.: Novosibirsk, Res. Laboratory EOPC, NSTU, 2010. – P. 646.
4. Сенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. М.:1985. – С. 215 – 217.
5. Сальников В.Г. и др. Тиристорная преобразовательная техника в металлургии. - М.: 2012. – С. 219 - 225.
6. Калюжный В.А. Исследование и разработка токовых преобразователей для электропривода. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. 2012. – С. 29.
7. Обухов С.Г., Мендыбаев С.А. Анализ алгоритмов управления вентилями токопараметрического преобразователя - М.: Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. 2010. – С. 253 - 255.
8. Issenov S. S, Issenov Z. S., Mendybayev S.A., Nurzhan N.N. Control Mealy Automaton for Microprocessor Control Device Development of Algorithm Flow Graph, Mealy Automaton of Microprogram Graph and Mathematical Models. INTERNATIONAL SIBERIAN CONFERENCE ON CONTROL AND COMMUNICATIONS (sibcon), 2017. Astana.
9. Mendubayev S., Sarsikeyev Y., Kapanova d. Control of Valve Converters with Natural Current Haracteristics. Matec Web of Conferences 155. 01047/ 2018.
10. Akimzhanov T., Zhumazhanov S., Sarsikee Ye. Valve converter with steeply falling external characteristics.III International Conference "Cognitive Robotics" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – P. 516.

REFERENCES

1. Zinoviev G.S. Osnovi sikovoi elektroniki: momograpia. - Izdatelstvo NGTU, M.: 2015. – S. 664.
2. Kitaiyev U.V. Osnovi zifrovoy tehniky. - Uchebnoe posobie. SPb: SPbFU ITMO, 2007. – S. 87 - 89.
3. Zinoviev G.S. Fundamentals of Power Electronics. - Monogr.: Novosibirsk, Res. Laboratory EOPC, NSTU, 2010. – S. 646.
4. Selchanski A.D. Smelianski M.Ya. Elektricheskie promichlennye pechi. M.: 1985. – S. 215 – 217.
5. Salnikov V.G. I dr. Tiristornaya preobrazovatel'naya tehnika v metallurgii. – M.: 2012 – S. 219 - 225.
6. Kliuyjni V.A. Issledovanie I razrabotka tokovykh preobrazovatelei dlya elektroprivoda. Avtoreferat dissertezii na soiskanie uchenoi stepeni k.t.n. 2012. S.29.
7. Obuhov S.G., Mendybayev S.A. Analis algoritmov upravleniya venikiyami tokoparametricheskogo preobrasovatelya – M.: Elektrotehnicheskaya promichlennost. Preobrazovatel'naya tehnika. 2010 – S. 253.
8. Issenov S. S, Issenov Z. S., Mendybayev S.A., Nurzhan N.N. Control Mealy Automaton for Microprocessor Control Device Development of Algorithm

Flow Graph, Mealy Automaton of Microprogram Graph and Mathematical Models. INTERNATIONAL SIBERIAN CONFERENCE ON CONTROL AND COMMUNICATIONS (sibcon), 2017. Astana

9. Mendubayev S., Sarsikejev Y., Kapanova d. Control of Valve Converters with Natural Current Characteristics. Matec Web of Conferences 155. 01047/ 2018.

10. Akimzhanov T., Zhumazhanov S., Sarsikejev Ye. Valve converter with steeply falling external characteristics. III International Conference "Cognitive Robotics" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – P. 516.

МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕ ТОК КӨЗІНІҢ ӨТПЕЛІ РЕЖИМДЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ускенбаев Д.Е., PhD, қаумдастырылған профессор

Мендыбаев С.А., т.ғ.к., доцент

*С. Сейфуллина атындағы Қазақ агротехникалық университеті,
Жеңіс д., 62, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан, usdan@mail.ru*

Резюме

Жұмыс барысында көздің өзіндік ерекшеліктерін есепке ала отырып, ток көзінің өтпелі режимдерінің математикалық моделі әзірленді (шығу тогының нөлдік мәндерін ғана коммутациялау). Жүктеме келесі түрде өзгерді: $Z_{жс} = 0$ - ден (қысқа тұйықталған режим) $Z_{жс} = Z_{жсНОМ}$ (номиналды режим) дейін, параметрлік көздің резонанстық контурының Q ($Q = \omega L / RL$) қайырымдылығының әртүрлі мәндерінде. Зерттелетін ток көзі айнымалы кернеу жүйесі айнымалы ток жүйесіне түрлендірілетін резонанстық схема болып табылады. Үш фазалы-бір фазалы ток көзінің алмастыру сұлбасы және оның математикалық моделінің құрылымы. Талданатын ток көзі үлкен қуаттың техникалық құрылғыларына жатады.

Кілттік сөздер: ток, кернеу, интегратор, сумматор, инвертор, сигнал, математикалық модель, талдау.

INVESTIGATION OF TRANSIENT MODES OF A CURRENT SOURCE ON A MATHEMATICAL MODEL

Uskenbaev D. E., PhD, associate Professor

*Mendubayev S.A., PhD, associate Professor
S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Zhenis Avenue, 62, Nur-
Sultan, Kazakhstan, usdan@mail.ru*

Summary

In this paper, a mathematical model of transient modes of the current source is developed, taking into account the characteristic features of the source (switching only zero values of the output current). The load varied from $Z_{load} = 0$ (short-circuited mode) to $Z_{load} = Z_{load\ NOM}$ (nominal mode), for different Q -values of the resonant contour of the parametric source ($Q = \omega L / R_L$). The current source under study is a resonant circuit in which a system of alternating voltages is converted into a system of alternating currents. Substitution scheme of a three-phase-single-phase current source and the structure of its mathematical model. Analyze the current source refers to the technical devices of large capacity.

Keywords: *current, voltage, integrator, adder, inverter, signal, mathematical model, analysis*