

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Введение. В последние годы по всем направлениям продолжается процесс совершенствования известных и разработки новых систем преобразования параметров электрической энергии (СППЭ), составной частью которых является полупроводниковый преобразователь.

Среди большого многообразия СППЭ особую группу представляют преобразователи, работающие в режиме преобразования системы неизменного напряжения в систему неизменного тока, область эффективного применения которых весьма обширна и охватывает многие отрасли промышленности [1].

В качестве устройств, реализующих $I=\text{const}$, использовались индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) [1,2]. Наряду с широко известными достоинствами таких систем, им присущ ряд недостатков, из-за которых не удастся в полной мере реализовать высокую стабильность тока во всем диапазоне изменения нагрузки, быстродействие, большой диапазон регулирования тока, инвариантность к возмущениям и электромагнитную совместимость (ЭМС) с сетью.

Регулируемым источником тока, выполненным на основе регулируемого источника напряжения с регулятором тока, также присущи недостатки: низкий коэффициент мощности, чувствительность к возмущениям, искажение напряжения сети, недостаточное быстродействие [2].

Постановка задачи исследования. Разработка новых схемотехнических решений всегда сопровождается естественным стремлением реализовать наилучшие (предельно-возможные) их технические характеристики.

В работе рассматривается один из возможных путей построения высокоэффективных систем стабилизации тока (ССТ) с релейным управлением при работе на различные виды нагрузок. Под высокоэффективной ССТ будем понимать систему, реализующую предельное быстродействие, высокую точность поддержания выходной координаты во всем диапазоне регулирования, низкую чувствительность к внешним и параметрическим возмущениям и обладающую высокой степенью электромагнитной совместимости.

Материалы исследования. Если при синтезе САР ставится задача обеспечения одновременно высокой точности обработки задания и низкой чувствительности к различным возмущениям, то система должна быть устойчивой при неограниченном увеличении коэффициента усиления регулятора тока, который может быть реализован в релейной системе, работающей в скользящем режиме. Обеспечение высокой частоты переключения в скользящем режиме позволяет реализовать усилитель мощности, выполненный на полностью управляемых вентилях (запираемые тиристоры или IGBT-транзисторы).

К исследованию была принята система стабилизации тока, функциональная схема которой представлена на рис.1 [3]. Вентили моста работают с углом $\alpha=0$ и выполняют роль ключа, коммутирующего цепь нагрузки, а любых два последовательно включенных вентиля, при необходимости, - роль обратного диода.

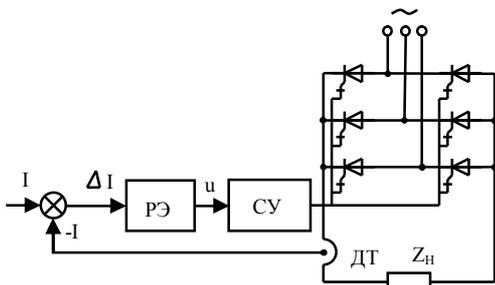


Рис.1. Функциональная схема ССТ с релейным управлением

ча, коммутирующего цепь нагрузки, а любых два последовательно включенных вентиля, при необходимости, - роль обратного диода.

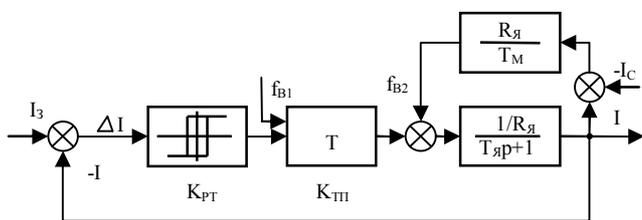


Рис.2. Структурная схема системы стабилизации тока с релейным управлением

Уравнение замкнутой системы будет иметь вид:

$$I(p) = I_3(p) \times \frac{k_{РТ} \cdot k_{ТП} \cdot \frac{1}{R_я} \cdot T_{МП}}{T_{МП} \cdot (T_я p + 1) + 1 + k_{РТ} \cdot k_{ТП} \cdot \frac{1}{R_я} \cdot T_{МП}} + \frac{I_c(p)}{T_{МП} \cdot (T_я p + 1) + k_{РТ} \cdot k_{ТП} \cdot \frac{1}{R_я} \cdot T_{МП}} \quad (1)$$

В качестве нагрузки могут быть либо якорь машины постоянного тока, либо катушка индуктивности, либо конденсатор (зарядные устройства).

Покажем некоторые свойства ССТ при стабилизации тока якоря двигателя постоянного тока. Учитывая, что электрохимическая постоянная времени двигателя T_m обычно больше электромагнитной постоянной времени $T_я$, то внутреннюю обратную связь по ЭДС двигателя можно рассматривать как возмущение, действующее на объект. Структурная схема системы стабилизации тока якоря для этого случая представлена на рис.2 [3].

и при $k_{PT} \rightarrow \infty$ имеем

$$I(p) = I_3(p), \quad (2)$$

т.е. обеспечивается высокое качество стабилизации тока. Частота релейного режима в относительных единицах при этом будет

$$\nu^* = \frac{\left[I_3^* + f_{B1}^* + (I_3^* - I_C^*) \frac{t^*}{T_M^*} \right] \cdot \left[1 - I_3^* + f_{B1}^* + (I_3^* - I_C^*) \frac{t^*}{T_M^*} \right]}{2a^*}. \quad (3)$$

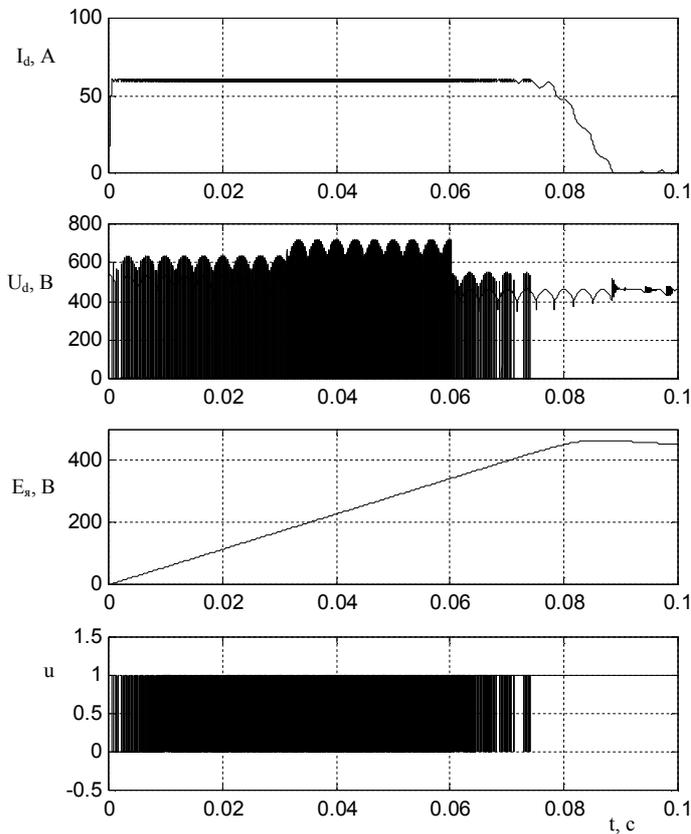


Рис.3. Реакция системы на действие возмущений

рицательно сказываются на работе питающей сети и других потребителей.

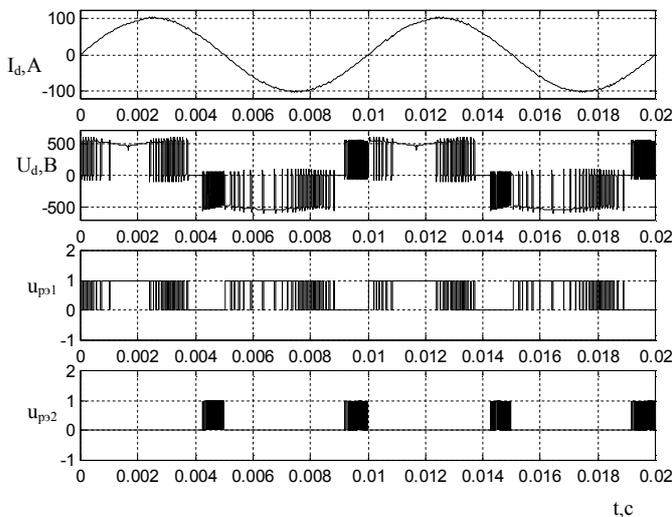


Рис.4. Отработка синусоидального закона

Реакция системы стабилизации тока якоря на действие возмущений показана на рис.3, из которого следует, что колебания напряжения сети (возмущение f_{B1}) и возрастающая ЭДС якоря (возмущение f_{B2}) не оказывают влияния на процесс стабилизации тока, т.е. ССТ инвариантна к этим возмущениям.

В качестве примера, демонстрирующего способность релейной ССТ обрабатывать различные законы изменения задающего сигнала, показана на рис.4 отработка синусоидального закона (в этом случае преобразователь двухкомплектный).

Принятый принцип построения ССТ позволил реализовать предельное быстродействие, инвариантность к возмущениям, уменьшить индуктивность сглаживающего дросселя, исключить силовой согласующий трансформатор и режим прерывистых токов во всем диапазоне регулирования, что особенно важно для электропривода.

Однако, результаты исследования гармонического состава, потребляемого из сети тока, указывают на необходимость принятия мер по улучшению электромагнитной совместимости ССТ с сетью.

ССТ с высокой электромагнитной совместимостью. Любой преобразователь с самыми лучшими показателями работы теряет свою привлекательность, если режимы его работы отрицательно сказываются на работе питающей сети и других потребителей.

Поэтому особую остроту и актуальность приобретают вопросы, связанные с улучшением их электромагнитной совместимости при сохранении, в данном случае, принципов построения ССТ, рассмотренных выше.

Проблема улучшения качества потребляемой энергии не может быть эффективно решена посредством пассивных LC-фильтров из-за присутствующих им недостатков, тем более с учетом непостоянства частоты релейного режима в процессе работы ССТ.

В ССТ при питании от 3-х фазной сети, с учетом рекомендаций [4,5], входные токи должны быть симметричными и синусоидальными, совпадать по фазе с соответствующими напряжениями, а выходной ток в цепи нагрузки должен быть стабильным во всем диапазоне регулирования.

Реализовать перечисленные условия ЭМС наиболее полно удастся применением силовых

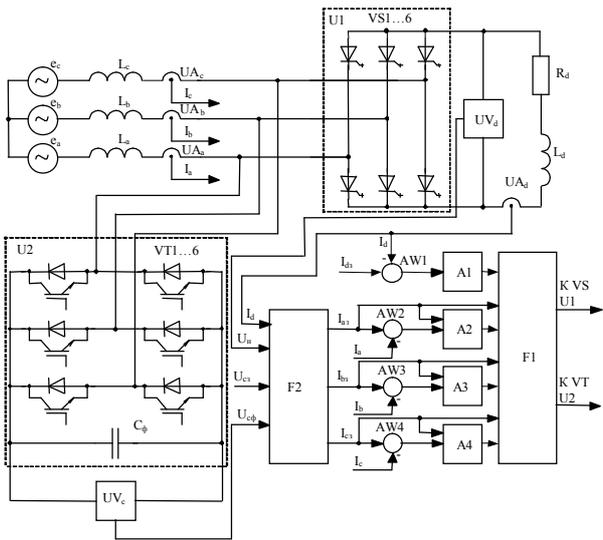


Рис.5. Функциональная схема ССТ с САФ

стоянного (релейный регулятор тока нагрузки) [7]. При этом необходимым условием, обеспечивающим качество потребляемой из сети энергии, является

$$i_a, A; \quad e - 10, B$$

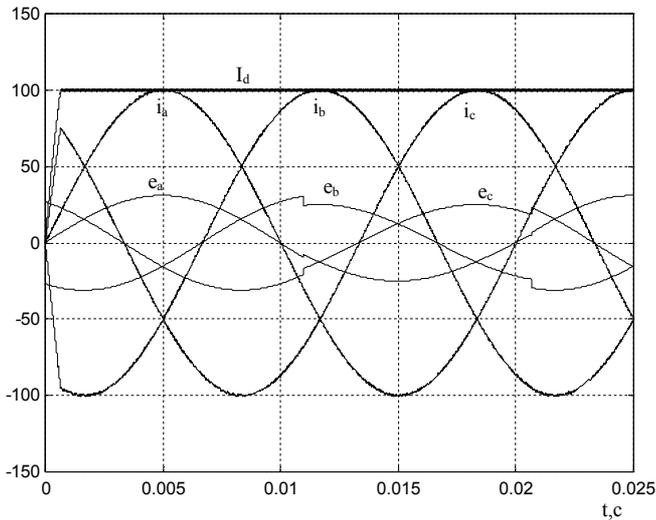


Рис.6. Процесс формирования токов и реакция на изменение напряжения сети

потребляемых из сети токов и тока нагрузки, т.е. ССТ не чувствительны к их действию.

Реакция ССТ на управляющее воздействие иллюстрируется кривыми, представленными на рис.7. При уменьшении задания на величину выходного тока I_d блок F2 изменяет и задание на величину входных токов i_a , i_b , i_c для сохранения баланса активной мощности в системе сеть-преобразователь-нагрузка.

Возможность организации рекуперации энергии показана на рис.8, соответствующие фазные напряжения и токи находятся в противофазе.

В процессе анализа работы ССТ с САФ было установлено, что она является системой с переменной структурой (СПС), связи между функциональными элементами которой меняются тем или иным образом в зависимости от состояния системы. В [8] указывается, что и в этом случае возникновение скользящих режимов позволяет организовать движение системы, инвариантное к действию возмущений, сохранив при этом все указанные выше качества ССТ. Были определены и подтверждены цифровым моделированием условия существования скользящих режимов. На рис.9 показаны осциллограммы работы ССТ при варьированном напряжении на конденсаторе САФ. Снижение напряжения до 550В (интервал времени 0,035-0,05с) приводит к нарушению условия (4) и условия существования скользящих режимов [9], о чем свидетельствует увеличение ошибок фазных токов.

Выше показана возможность ССТ с САФ реализовать двунаправленное движение потоков энергии: сеть – нагрузка и нагрузка-сеть. Это является предпосылкой к формированию системы синусоидальных токов в трехфазной нагрузке при питании основного преобразователя от источника постоянного напряжения (выпрямитель,

активных фильтров (САФ), обеспечивающих принудительное формирование практически синусоидальных потребляемых токов при отсутствии фазового сдвига между напряжением и током.

Сохранив силовой канал ССТ таким же, как на рис.1, и релейный принцип управления, функциональную схему ССТ с САФ представим на рис.5 [6].

Функциональная схема источника тока содержит силовой вентильный блок U1, силовой активный фильтр U2, фазные индуктивности L_a , L_b , L_c , датчики фазных токов UA_a , UA_b , UA_c , датчик тока UA_d и напряжения UV_d нагрузки, датчик напряжения конденсатора САФ – UV_c , сумматоры $AW1...4$, релейные элементы $A1...4$, логическое устройство F1, задатчик амплитуды фазных токов F2.

При разработке алгоритма управления ССТ необходимо было обеспечить согласованную работу вентилях силового блока U1 и САФ - U2, т.к. в рассматриваемой ССТ регулирование ведется как в цепи переменного тока (три релейных регулятора фазных токов), так и постоянного (релейный регулятор тока нагрузки) [7]. При этом необходимым условием, обеспечивающим качество

$$U_{cf}(t) > \{|U_{ab}(t)|, |U_{bc}(t)|, |U_{ca}(t)|\}, \quad (4)$$

где U_{cf} , U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} – мгновенные значения напряжения на конденсаторе фильтра и линейных напряжений питающей сети соответственно.

Принцип формирования входных токов в каждой фазе заключается в том, что в зависимости от комбинации открытых вентилях САФ контуры, содержащие линейные напряжения и дроссели, могут быть закорочены, либо в них вводится напряжение конденсатора согласно или встречно с линейным напряжением сети. В результате токи в дросселях могут увеличиваться или уменьшаться вплоть до достижения требуемой величины, определяемой мгновенным значением сигналов задания токов для каждой из фаз.

На рис.6 представлены кривые потребляемых из сети токов и тока в цепи нагрузки, фазные токи практически синусоидальны и синфазны с соответствующими напряжениями ($\cos\phi=1$). Возможные колебания напряжения питающей сети, которые можно рассматривать как внешнее воздействие, не оказывают влияния на величину и форму

генератор, аккумуляторная батарея, и т.п.), т.е. и рассмотрению работы ССТ в режиме частотно-токового преобразователя с релейным управлением [10,11].

Функциональная схема частотно-токового преобразователя приведена на рис.10, а на рис.11 – процессы формирования выходных токов на частоте 100Гц (выходные токи i_a , i_b , i_c имеют синусоидальную форму).

Выполненные исследования показали, что предложенный преобразователь частоты обеспечивает высококачественное формирование синусоидальных выходных токов в широком диапазоне изменения их частоты и амплитуды с предельным быстродействием при нечувствительности к действию возмущений. Использование предложенных ССТ в электроприводах постоянного и переменного тока отражено в работах [12,13,14].

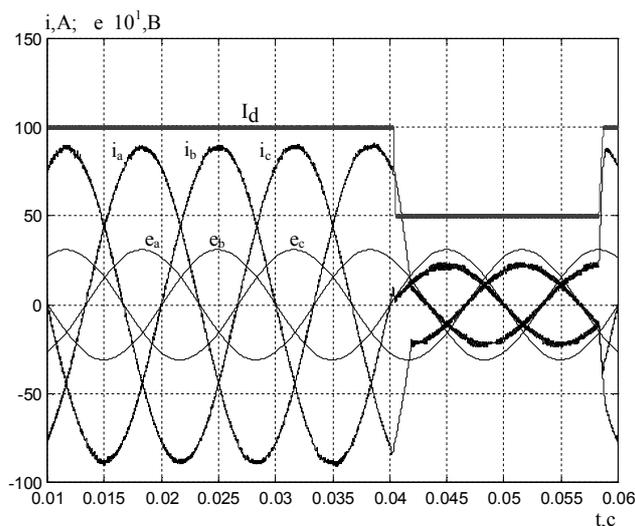


Рис.7. Реакция ССТ на изменение тока задания

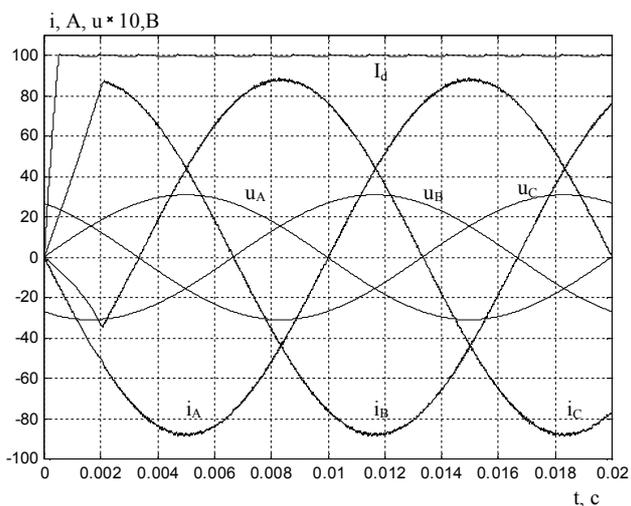


Рис.8. – Режим рекуперации энергии в сеть

формированием синусоидальных потребляемых токов обеспечивает предельное быстродействие, высокую точность воспроизведения задающего воздействия, инвариантность к действию возмущений, высокую степень электромагнитной совместимости с сетью и потребителем.

ССТ обладает расширенными функциональными возможностями, реализуя следующие режимы работы при неизменной силовой части и системе управления:

- преобразование трехфазного переменного напряжения в стабилизированный постоянный ток с возможностью регулирования его величины;

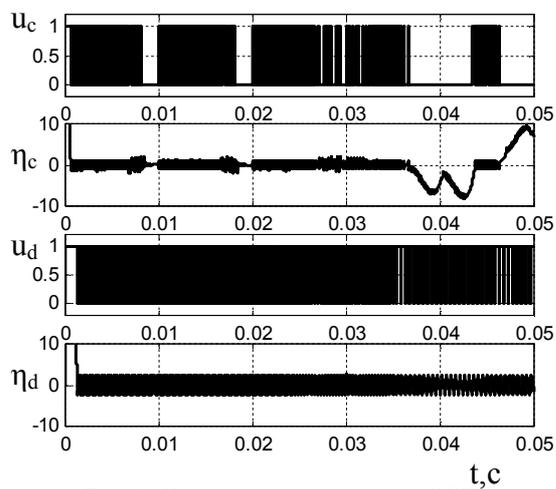
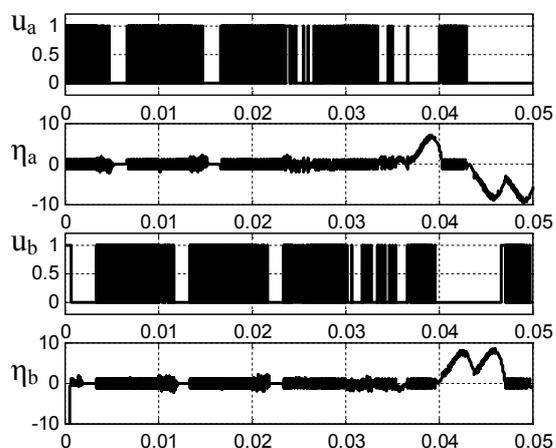
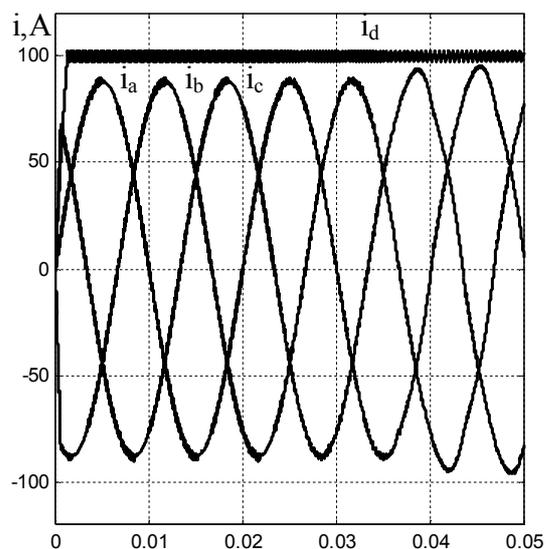


Рис.9. Скользящие режимы в ССТ

Выводы. Разработанная система стабилизации тока с релейным управлением и принудительным

формированием синусоидальных потребляемых токов обеспечивает предельное быстродействие, высокую точность воспроизведения задающего воздействия, инвариантность к действию возмущений, высокую степень электромагнитной совместимости с сетью и потребителем.

ССТ обладает расширенными функциональными возможностями, реализуя следующие режимы работы при неизменной силовой части и системе управления:

- преобразование трехфазного переменного напряжения в стабилизированный постоянный ток с возможностью регулирования его величины;

- преобразование трехфазного переменного напряжения в однофазный стабилизированный синусоидальный (или другой формы) ток с возможностью регулирования его амплитуды и (или) частоты;
- преобразование постоянного напряжения в трехфазный синусоидальный стабилизированный ток с возможностью регулирования его амплитуды и (или) частоты.
- электроприводы постоянного и переменного тока, выполненные на базе таких ССТ, так же обладают повышенным быстродействием и точностью стабилизации координат, низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям;

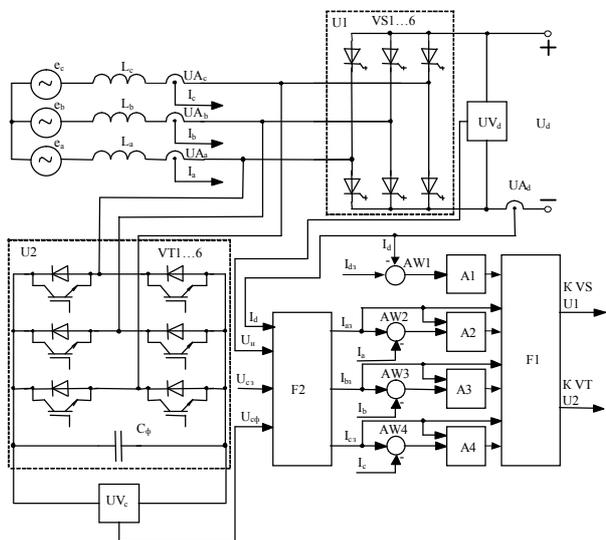


Рис.10. Функциональная схема ССТ в режиме ПЧ

- в каскадных схемах, благодаря улучшенному гармоническому составу выходного тока ССТ, снижаются потери мощности в двигателе, повышается перегрузочная способность по моменту.

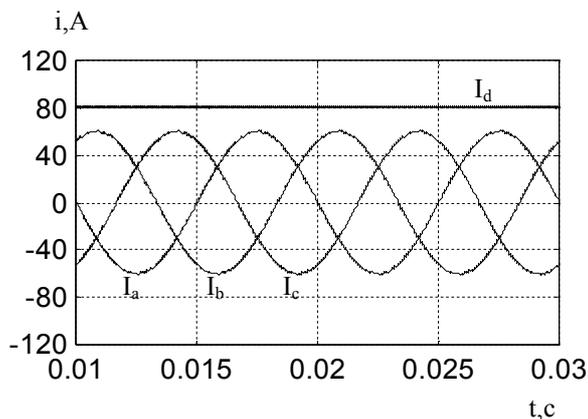


Рис.11. Работа ССТ в режиме ПЧ

Литература.

1. Милых А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индукционно-емкостных преобразователей. – Киев: Наук. Думка, 1974. – 216с.
2. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергия, 1974. – 144с.
3. Самчелев Ю.П., Скурятин Ю.В., Дрючин В.Г., Шевченко И.С. Системы стабилизации тока с релейным управлением//Электротехника и электроэнергетика. – 2004. - №1. – С.60-65.
4. Шидловский А.К., Козлов А.В., Комаров Н.С. и др. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью.– Киев: Наук. Думка, 1993. – 272с.
5. Шидловский А.К., Состояние и перспективы развития научных исследований в области преобразовательной техники в УССР//Тез. докл. III все союз. Науч.-техн. Конф. «Проблемы преобразовательной техники» (Киев, 1983г.). – К. – Ин-т электродинамики АН УССР, 1983. – ч.1. – С. 3-63
6. Скурятин Ю.В. Самчелев И.С., Шевченко И.С. Вентильный источник тока с релейным управлением//Техн. электродинамика. – 2003. – №5. – С.25 – 29
7. Патент на винахід України, №66628, НО2М 7/12. Регульоване джерело струму / Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко І.С., Бюл. №7.- 2007.
8. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В.Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592с.
9. Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Яблонь В.П. Скользящие режимы в вентильном источнике тока с релейным управлением // Техн. электродинамика. – 2006. – №5. – С.29 – 33
10. Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко И.С. и др. Частотно-токовый преобразователь с релейным управлением// Техн. электродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”, частина 3. – 2003. – С.5 - 8.
11. Патент на винахід України, №66191, НО2М 5/12. Перетворювач частоти струму. / Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко І.С., Морозов Д.І., Бюл.№7. - 2007.
12. Карпук И.А., Морозов Д.И., Скурятин Ю.В., Самчелев Ю.П., Шевченко И.С. Асинхронно вентильный каскад с синусоидальными роторными токами и высоким коэффициентом мощности Вестник ХГПУ. Тематический выпуск « Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.» Харьков, НТУ «ХПИ», 2003, №10. – т.1. – С. 401 – 405.
13. Патент України №66190, НО2Р 27/04. Асинхронний вентильний каскад // Карпук И.А., Морозов Д.И., Скурятин Ю.В. и др. – Бюл. №6. – 2006.
14. Патент України №73605, НО2Р 7/62. Электропривід змінного струму//Шевченко І.С., Самчелев Ю.П., Скурятин Ю.В. та інші. – Бюл.№8. – 2005.