

**НАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО РЕКУПЕРАЦИОННОГО ТИПА  
С УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ\***

*Разработана имитационная модель нагрузочного устройства рекуперационного типа с улучшенными динамическими характеристиками. Проведено исследование характеристик нагрузочного устройства рекуперационного типа с каскадным включением импульсного и непрерывного стабилизаторов тока.*

*Ключевые слова: нагрузочное устройство, энергосбережение, рекуперация, динамические характеристики.*

Нагрузочное устройство рекуперационного типа (НУРТ) используется в составе энергосберегающего испытательного комплекса (ЭИК), предназначенного для наземных испытаний мощных вторичных источников электропитания космических аппаратов [1]. Этот комплекс также включает в себя стабилизирующий выпрямитель, имитатор первичного источника электропитания, испытываемый источник вторичного электропитания (ИВЭП).

Топология нагрузочного устройства определяет коэффициент полезного использования электроэнергии всего энергосберегающего испытательного комплекса. Применение НУРТ, осуществляющего частичный возврат электроэнергии в сеть постоянного тока, питающую испытательный комплекс, позволяет значительно улучшить энергетические характеристики ЭИК по сравнению с нагрузочным устройством со сбросом энергии в окружающую среду в виде тепла.

В [2] рассмотрен НУРТ с импульсным регулирующим элементом. В результате моделирования и экспериментальных исследований были выявлены такие его недостатки, как небольшая скорость нарастания входного тока НУРТ при имитации ступенчатой коммутации нагрузки и узкая полоса частот воспроизведения гармонических помех. Для улучшения динамических характеристик НУРТ авторами предложено использовать каскадное включение двух стабилизаторов тока: непрерывного (НСТ) и импульсного (ИСТ).

Исследование характеристик нагрузочного устройства рекуперационного типа с улучшенными динамическими характеристиками выполнялось с помощью пакета схемотехнического моделирования Micro-CAP.

Имитационная модель НУРТ (рис. 1) состоит из ИВЭП, первичного источника электроэнергии (ПИЭ), питающего ИВЭП, и НУРТ, являющегося нагрузкой для ИВЭП. НУРТ содержит включенные каскадно НСТ и ИСТ, причем НСТ стабилизирует входной ток НУРТ, а ИСТ – ток, протекающий через НСТ, что ограничивает мощность, выделяемую на транзисторах НСТ. Выход ИСТ подключен параллельно через развязывающие диоды к выходу ПИЭ, что позволяет рекуперировать электроэнергию в сеть постоянного тока электропитания ЭИК. Такая структура объединяет в себе высокое быстродействие устройств, работаю-

щих в непрерывном режиме, и высокий КПД устройств, функционирующих в импульсном режиме.

В непрерывный стабилизатор тока входят шесть параллельно включенных МДП-транзисторов VT1–VT6 по схеме «общий источник» и операционный усилитель (ОУ) DA3, вырабатывающий сигнал ошибки, пропорциональный отклонению входного тока НУРТ от требуемого значения выходного тока ИВЭП.

Импульсный стабилизатор тока выполнен в виде мостового импульсного преобразователя (ИП) с фазовым управлением с гальванической развязкой на повышающем трансформаторе. Силовая часть образована мостом VT7–VT10, повышающим трансформатором T1, выпрямителями VD7, VD6, VD11, VD12, выходным фильтром L6C19. Система управления ИП содержит ОУ DA4, вырабатывающий сигнал ошибки, пропорциональный отклонению тока, протекающего через НСТ, от требуемого значения. Элементы DD1–DD19, R32–R35, C12–C15 образуют фазоимпульсный модулятор, управляющий ключами ИП VT7–VT10. Параметры схемы моделирования ИСТ уточнены на основании экспериментальных исследований макета ИСТ.

С помощью разработанной модели были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых получены энергетические и динамические характеристики НУРТ.

Об эффективности НУРТ можно судить по коэффициенту рекуперации – отношению рекуперированной мощности к мощности, потребляемой НУРТ (рис. 2). Результаты моделирования показывают, что из-за введения НСТ коэффициент рекуперации НУРТ с улучшенными динамическими характеристиками ниже, чем коэффициент рекуперации НУРТ с ИСТ. С ростом мощности, потребляемой НУРТ с каскадным включением НСТ и ИСТ, коэффициент рекуперации растет, что обусловлено увеличением рекуперированной мощности по отношению к мощности, потребляемой НСТ, которая практически постоянна.

Анализ переходных процессов при ступенчатом набросе и сбросе входного тока НУРТ (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что НСТ в момент сброса выходит из активного режима (транзисторы НСТ полностью закрыты), в результате чего происходит затягивание фронта спада тока. Скорость нарастания входного тока НУРТ равна 30 А/мкс, скорость спада – 0,1 А/мкс.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

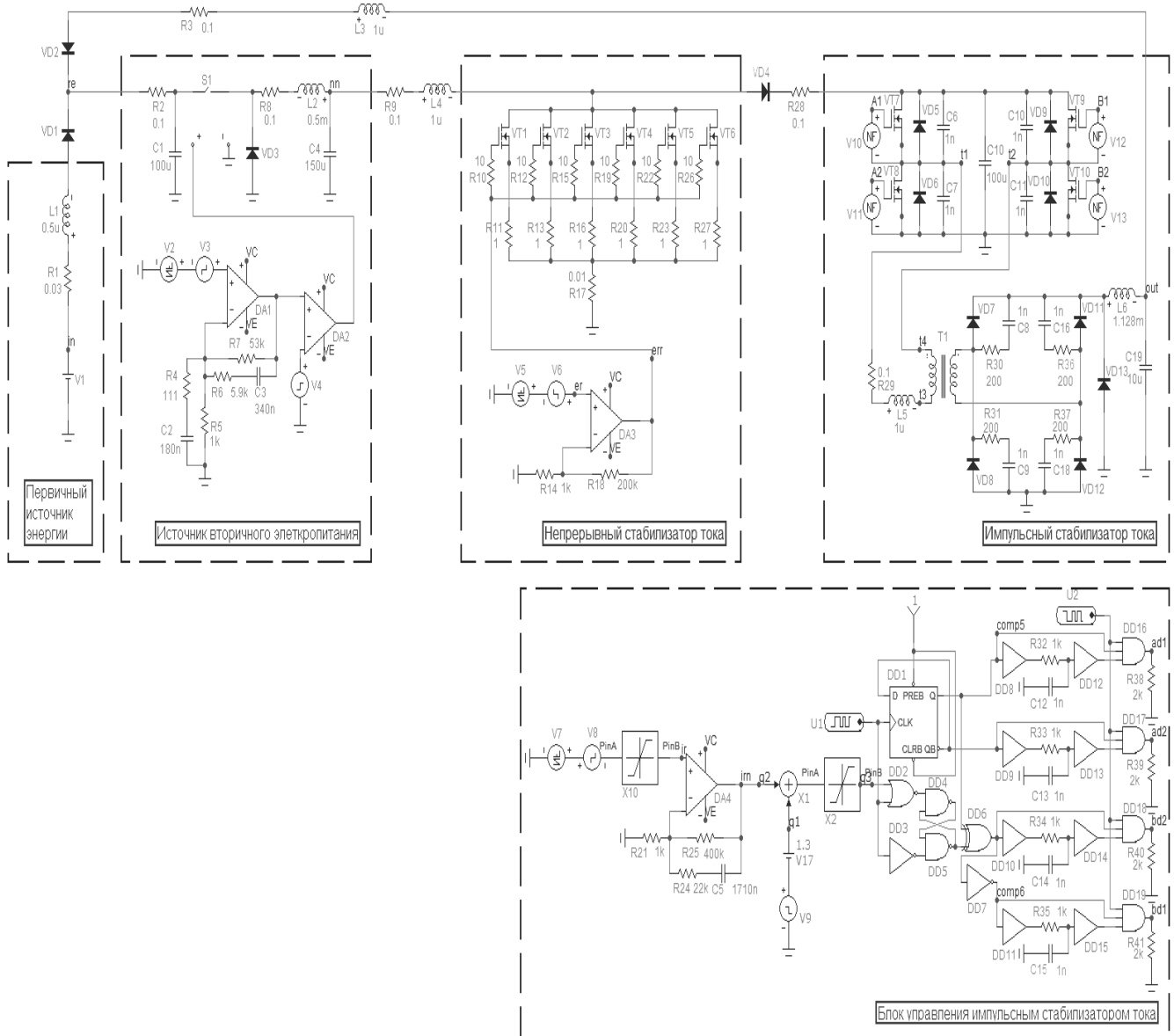


Рис. 1. Имитационная модель НУРТ, выполненная в пакете Micro-CAP

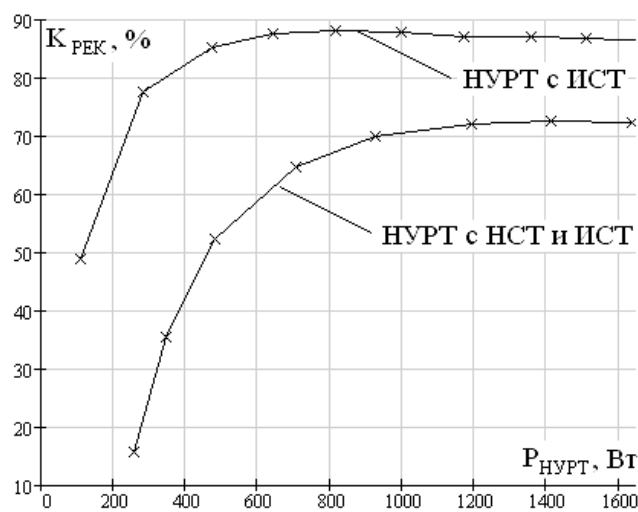


Рис. 2. Зависимость коэффициента рекуперации от входной мощности НУРТ

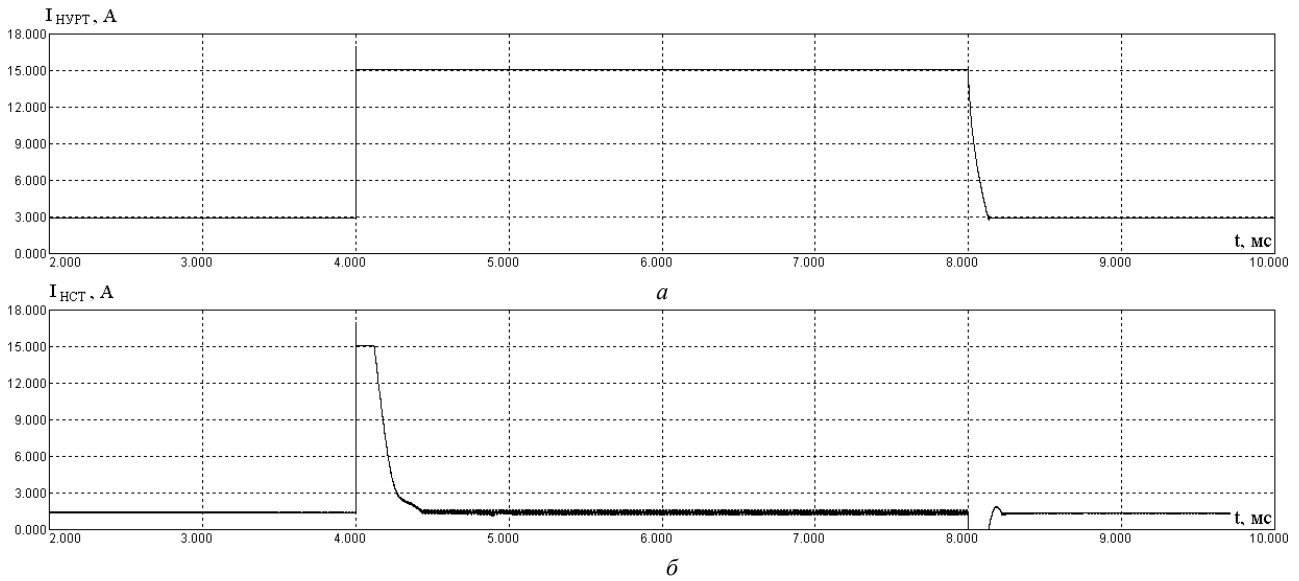


Рис. 3. Переходные процессы при ступенчатом набросе и сбросе входного тока НУРТ с постоянной установкой тока НСТ

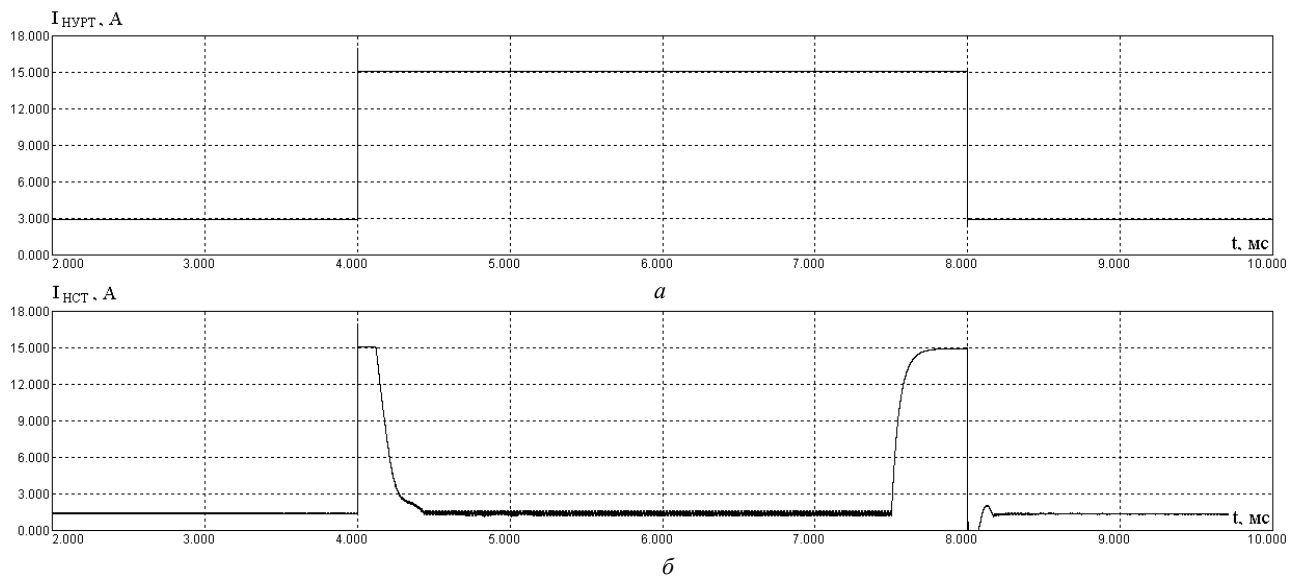


Рис. 4. Переходные процессы при ступенчатом набросе и сбросе входного тока НУРТ с изменяемой установкой тока НСТ

Увеличить скорость спада входного тока НУРТ можно за счет предварительного увеличения тока НСТ (рис. 4), когда ступенчатый сброс осуществляется за счет ступенчатого уменьшения тока НСТ, при этом скорость спада входного тока НУРТ составляет 26 А/мкс.

Рекуперация электроэнергии в сеть постоянного тока снижает мощность, потребляемую от ПИЭ. В установившемся режиме электроэнергия используется только для компенсации потерь в ИВЭП и НУРТ (рис. 5). Так, при входной мощности НУРТ в 1 500 Вт от ПИЭ потребляется мощность 550 Вт.

При длительных испытаниях ИВЭП нередко отключения сети переменного тока, приводящие к работе в аварийном режиме. Для исключения такого режима в состав испытательного комплекса вводится

источник бесперебойного питания. В этом случае рекуперация в сеть постоянного тока позволяет либо уменьшить емкость аккумуляторных батарей, либо увеличить время работы комплекса в аварийном режиме.

Реальные потребители электроэнергии на борту космического аппарата, как правило, имеют в своем составе импульсные преобразователи напряжения, являющиеся источниками импульсных и гармонических помех. Поэтому для проведения испытаний ИВЭП нагрузочное устройство должно иметь возможность наведения помех. Исследуемое НУРТ позволяет наводить синусоидальные помехи частотой до 100 кГц (рис. 6) и импульсные помехи частотой до 10 кГц (рис. 7). Максимальная амплитуда помех определяется величиной тока, стабилизируемого на

НСТ. Во избежание выхода НСТ из активного режима и искажения формы наводимого на входной ток НУРТ сигнала амплитуда гармонического или импульсного тока ограничена величиной тока, стабилизируемого на НСТ. В частности, увеличение тока,

стабилизируемого на НСТ, вызывает необходимость проектирования НСТ на большую мощность, что ухудшает его динамические характеристики, уменьшает коэффициент полезного использования энергии и увеличивает массу и габариты всего устройства.

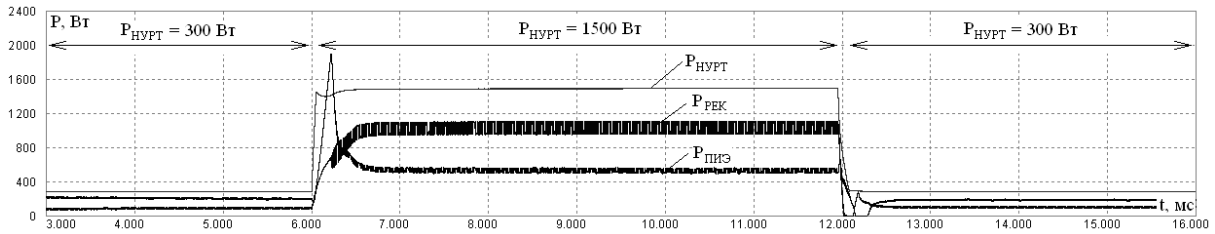


Рис. 5. Графики мощностей:  
 $P_{\text{НУРТ}}$  – входная мощность НУРТ;  $P_{\text{рек}}$  – рекуперированная мощность;  
 $P_{\text{ПИЭ}}$  – мощность, потребляемая от ПИЭ

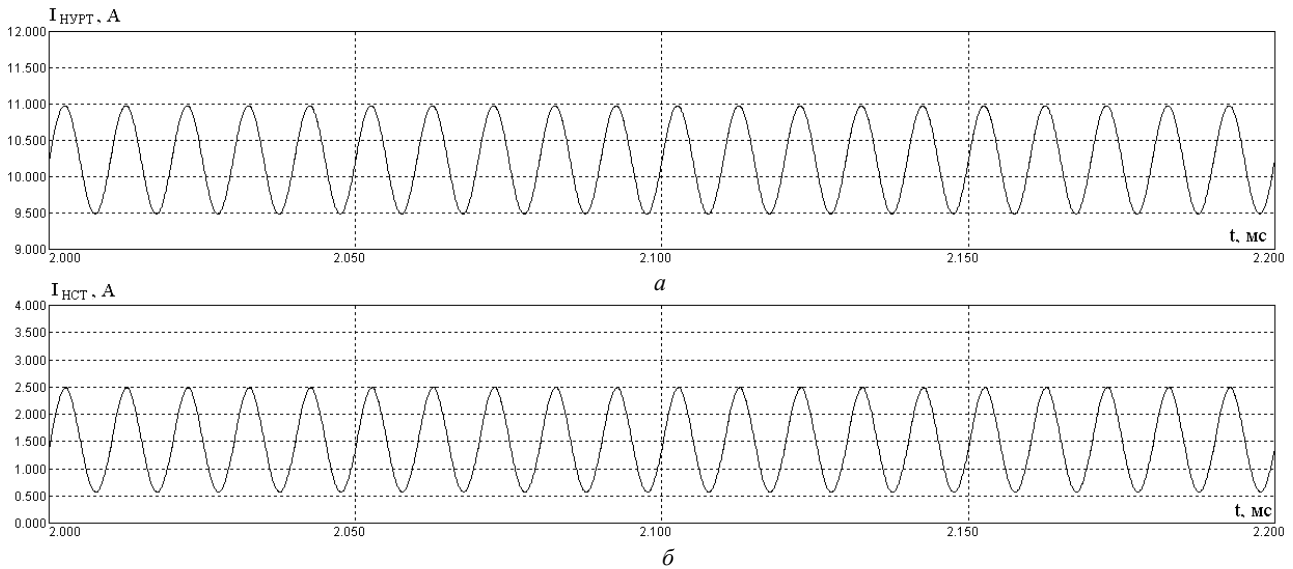


Рис. 6. Режим наведения синусоидальных помех

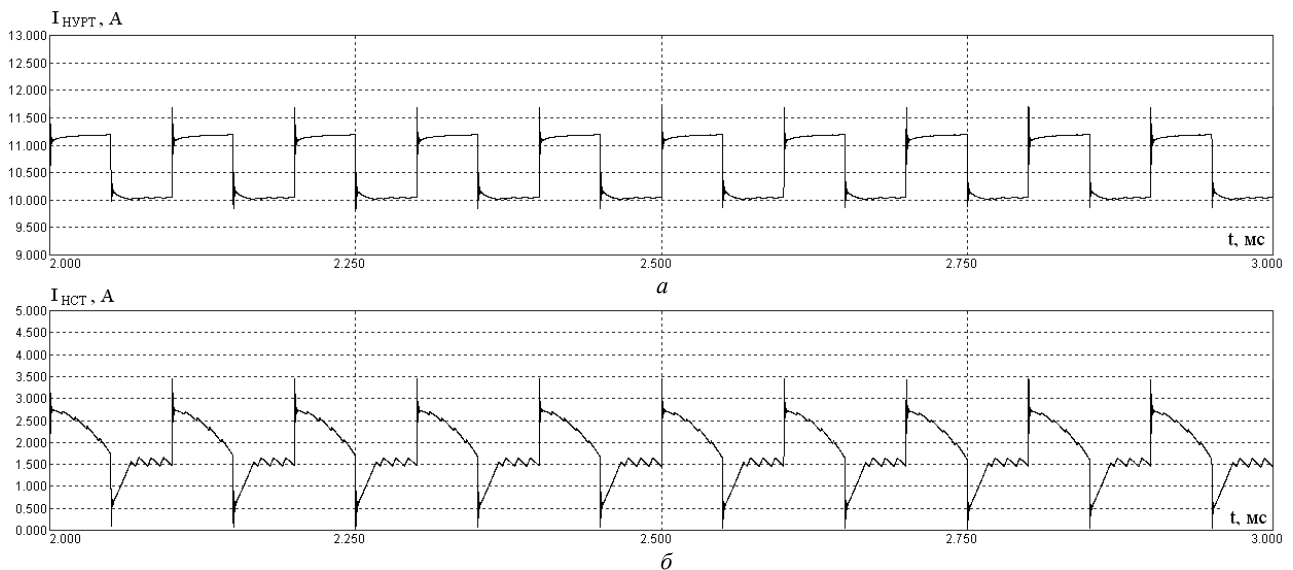


Рис. 7. Режим наведения импульсных помех

## Динамические характеристики НУРТ

Параметр	НУРТ с ИСТ	НУРТ с каскадным включением НСТ и ИСТ	Коэффициент улучшения (отношение параметров)
Длительность переходного процесса	285 мкс	22 мкс	13,0
Скорость нарастания входного тока НУРТ	0,04 А/мкс	30 А/мкс	750
Скорость спада входного тока НУРТ	0,05 А/мкс	26 А/мкс	520
Коэффициент рекуперации	85 %	72,2 %	0,85

Высокочастотные помехи (см. рис. 6) наводятся за счет изменения тока НСТ, и в этом случае динамические характеристики ИСТ таковы, что он практически не обрабатывает изменение тока НСТ. При наведении низкочастотных помех (см. рис. 7) ИСТ частично компенсирует изменение тока НСТ. Несимметричность графика тока НСТ (рис. 7, б) объясняется различием скорости нарастания и спада входного тока ИСТ.

Модель, разработанная в пакете Micro-CAP, позволяет сократить время на проектирование нагрузочных устройств рекуперационного типа и может быть использована для анализа динамических и энергетических характеристик НУРТ (см. таблицу).

Таким образом, каскадное включение регулирующих элементов существенно улучшает динамические характеристики НУРТ, но уменьшает коэффициент

полезного использования электроэнергии из-за потерь в НСТ. Этот недостаток особенно проявляется при относительно малых мощностях нагружения, соизмеримых с мощностью потребления НСТ (см. рис. 2).

## Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Динамический синтез нагрузочных устройств с рекуперацией электроэнергии в сеть электропитания испытательного комплекса энергосистем космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4 (37). С. 142–147.
2. Мизрах Е. А., Лобанов Д. К. Энергосберегающее нагрузочное устройство для испытаний систем электропитания постоянного тока // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (32). С. 56–61.

Е. А. Mizrakh, D. K. Lobanov

## LOADING DEVICE OF RECUPERATION TYPE WITH IMPROVED DYNAMIC CHARACTERISTICS

*Simulation model of loading device of recuperation type with improved dynamic characteristics for Micro-CAP program has been developed. Research of characteristics of loading device of recuperation type with cascade connection of impulse and continuous current regulators is performed and described in the article.*

*Keywords: loading device, energy-efficiency, recuperation, dynamic characteristics.*

© Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., 2012

УДК 621.01

Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ (ДЕЛЬТА-МЕХАНИЗМА)

*Рассмотрена кинематика манипулятора с параллельной структурой – дельта-механизма. Аналитически решена прямая задача кинематики манипулятора. Проведена проверка полученного решения с помощью трехмерного моделирования. Найдены крайние положения манипулятора и область рабочей зоны.*

*Ключевые слова: прямая задача кинематики, рабочая зона, дельта-механизм, устройства параллельной кинематики, манипуляторы.*

В некоторых областях техники перспективным является применение роботов-манипуляторов на основе механизмов параллельной кинематики, используемых при механической обработке изделий сложной формы (например, штампов, пресс-форм, лопаток турбин и т. д.), когда требуется перемещение инструмента по пяти-шести координатам.

В отличие от традиционных манипуляторов, структуры с параллельной кинематикой содержат замкнутые кинематические цепи и воспринимают нагрузку как пространственные фермы [1], т. е. звенья этих механизмов работают на растяжение и сжатие, что обеспечивает жесткость всей конструкции и, как следствие, повышение точности позиционирования схвата [2].