

В. А. ТОДОРЕНКО, С. К. ВАСИЛЕНКО (НТУУ «КПИ»)

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Киев, пр-т Победы, 37, тел.: (044) 454-94-32, эл. почта: [ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВЧ КОМПЕНСАТОРЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СРЕДЕ TCAD 6.2

Для большинства электрических устройств первичным источником электрической энергии является электрическая сеть 220 В, 50 Гц. Но далеко не все нагрузки являются чисто активными, что ведет к потреблению тока, форма которого и/или фаза не совпадают с синусоидальным напряжением сети. В случае RL или RC нагрузки ток источника питания сохраняет синусоидальную форму, но сдвигается по фазе в ту или иную сторону (в зависимости от типа нагрузки). Для нагрузки DRC-типа (диодный выпрямитель, С-фильтр, нагрузка), ток источника питания имеет вид коротких импульсов, амплитуда которых, в зависимости от параметров нагрузки и сопротивления сети, может в десятки раз превышать действующее значение тока.

Искажение формы тока, либо смещение его по фазе, относительно питающего напряжения, приводит к увеличению потерь в линии электропередачи, ухудшению условий работы генератора электрической энергии, искажению синусоидальной формы напряжения в сети.

В настоящее время, для устранения таких явлений, широко применяются высокочастотные компенсаторы реактивной мощности (корректоры коэффициента мощности), включаемые параллельно либо последовательно с нагрузкой.

Высокочастотные компенсаторы реактивной мощности можно классифицировать по следующим признакам:

- по способу включения:
  - параллельные (включаются параллельно с нагрузкой),
  - последовательные (включаются последовательно с нагрузкой).
- по характеру выходного напряжения:
  - с выходом на постоянном токе (только последовательные),
  - с выходом на переменном токе.

Преимуществом параллельных компенсаторов является более высокий КПД. Это объясняется тем, что в отличие от последовательных, в параллельных компенсаторах часть энергии без преобразования передается от источника в нагрузку. Преимуществом последовательных

компенсаторов является возможность коррекции формы выходного напряжения.

В настоящее время наиболее развитым является направление последовательных компенсаторов с выходом на постоянном токе [1-6]. В таких компенсаторах сигналы управления формируются специализированной микросхемой (PFC-контроллером). Существующие контроллеры реализуют управление релейного типа, ШИМ, либо ШИМ с учетом тока дросселя. Данные микросхемы выпускаются фирмами Philips, Thomson, Motorola, Siemens, Linear-Technology. Основными недостатками таких компенсаторов являются узкий круг нагрузок, т.к. на их выходе постоянное напряжение, несинусоидальная форма потребляемого тока, из-за использования в качестве задающего сигнала напряжения источника питания. Высокочастотные компенсаторы с выходом на переменном токе выполняются по двухзвенной структуре (корректор и инвертор). Такие схемы содержат избыточные элементы в силовой части, что ведет к удорожанию и увеличению массогабаритных показателей.

В данной работе исследованы электромагнитные процессы в параллельном ВЧ компенсаторе реактивной мощности с выходом на переменном токе, работающем на нагрузку DRC-типа. Для такой нагрузки характерно резкое изменение режима работы от холостого хода до максимальных токов. Рассмотрена модель системы управления, реализующая релейный принцип управления, из-за ограниченных возможностей пакета TCAD 6.2 по формированию моделей с широтно-импульсными модуляторами.

### Функциональная схема устройства

Функциональная схема параллельного компенсатора реактивной мощности с выходом на переменном токе приведена на рис.1, где: Д1 – Д3 – датчики, Р – регулятор, К1 – К2 – компараторы, ФИ1 – ФИ2 – формирователи импульсов, ГОСН – генератор опорного синусоидального напряжения, М – модулятор, СУ – система управления. Силовая часть представляет собой

© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

реверсивный преобразователь, выполненный на транзисторах (VT1 – VT4) и диодах (VD1 – VD4), в одну из диагоналей которого, последовательно с дросселем L1, включена сеть, а в другую – накопительный элемент (конденсатор C1).

Система управления, является замкнутой системой релейного типа, реализующей отрицательную обратную связь по отклонению входного тока от опорного синусоидального, с

каналом подчиненного управления, корректирующего амплитуду опорного синусоидального напряжения в зависимости от величины нагрузки. Система управления параллельного компенсатора (рис.1), содержит только два канала управления: канал стабилизации формы входного тока и подчиненный канал формирования амплитуды входного тока.

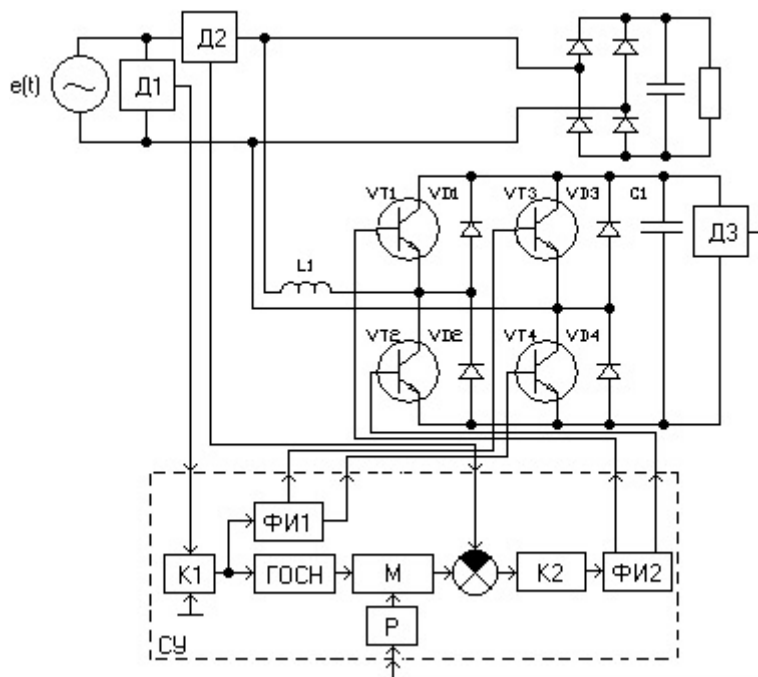


Рис. 1.

### Работа силовой части на интервалах

Период работы схемы, для DRC-нагрузки (рис.2), можно разделить на шесть интервалов: 1) 0..t1, 2) t1..t2, 3) t2..T/2, 4) T/2..t3, 5) t3..t4, 6) t4..T.

На первом и третьем интервалах реверсивный преобразователь обеспечивает отбор электрической энергии от источника питания и передачу ее в накопительный конденсатор C1. На этих интервалах работают выделенные элементы схемы, представленной на рис.3,а. Схема представляет собой преобразователь повышающего типа, нагруженный на накопительный конденсатор C1.

На втором интервале реверсивный преобразователь обеспечивает передачу электрической энергии от накопительного конденсатора C1 в нагрузку. Эквивалентная схема преобразователя на данном интервале представлена на рис.3,б. Схема представляет собой преобразователь понижающего типа, источником энергии

в котором является накопительный конденсатор C1.

На четвертом и шестом интервалах реверсивный преобразователь обеспечивает отбор электрической энергии от источника питания и передачу ее в накопительный конденсатор C1. На данном интервале работают выделенные элементы схемы, представленной на рис.3,в. Схема представляет собой преобразователь повышающего типа, нагруженный на накопительный конденсатор C1.

На пятом интервале реверсивный преобразователь обеспечивает передачу электрической энергии от накопительного конденсатора C1 в нагрузку.

Эквивалентная схема преобразователя представлена на рис.3, г. Схема представляет собой преобразователь понижающего типа, в котором источником энергии является накопительный конденсатор C1.

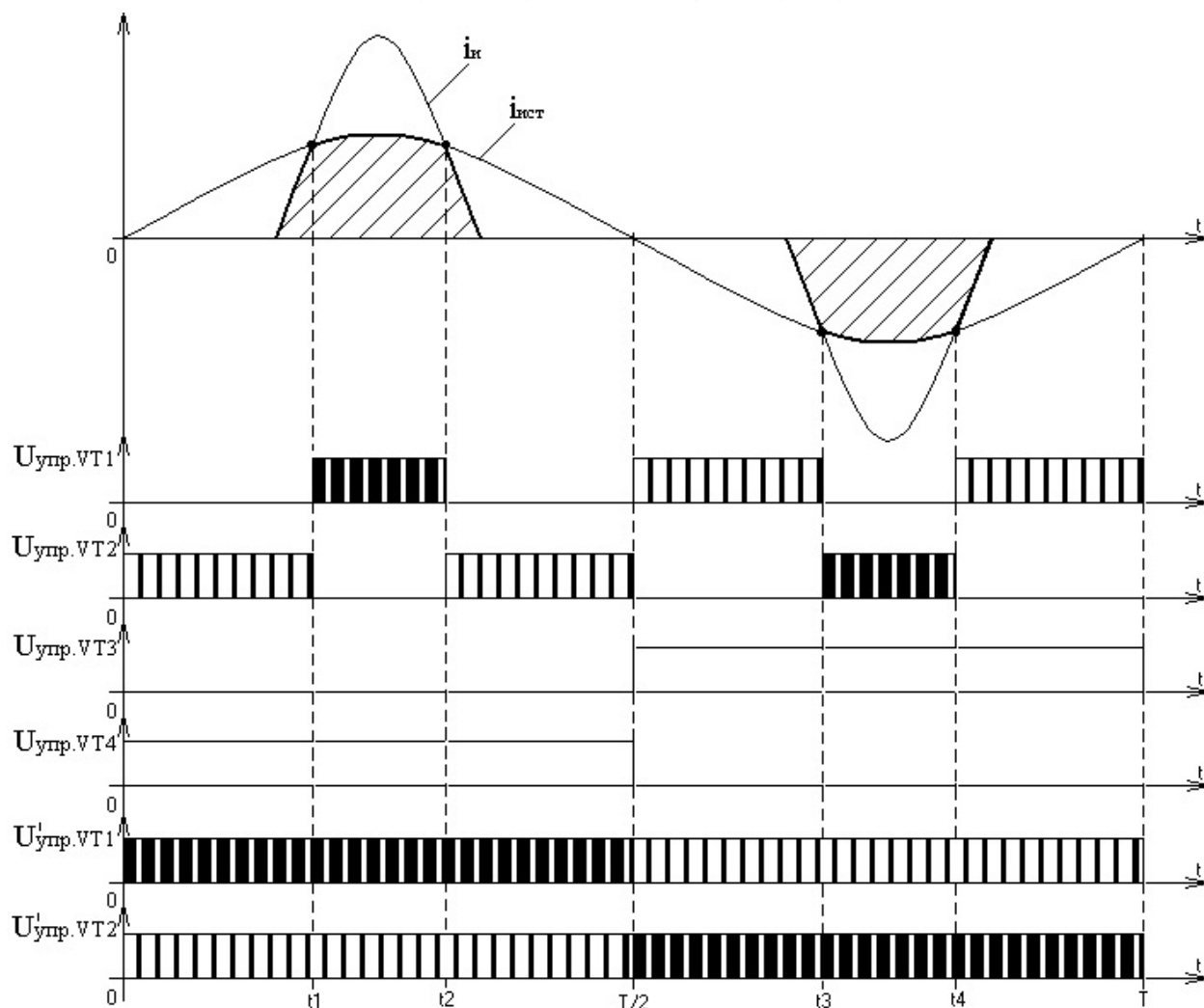


Рис. 2.

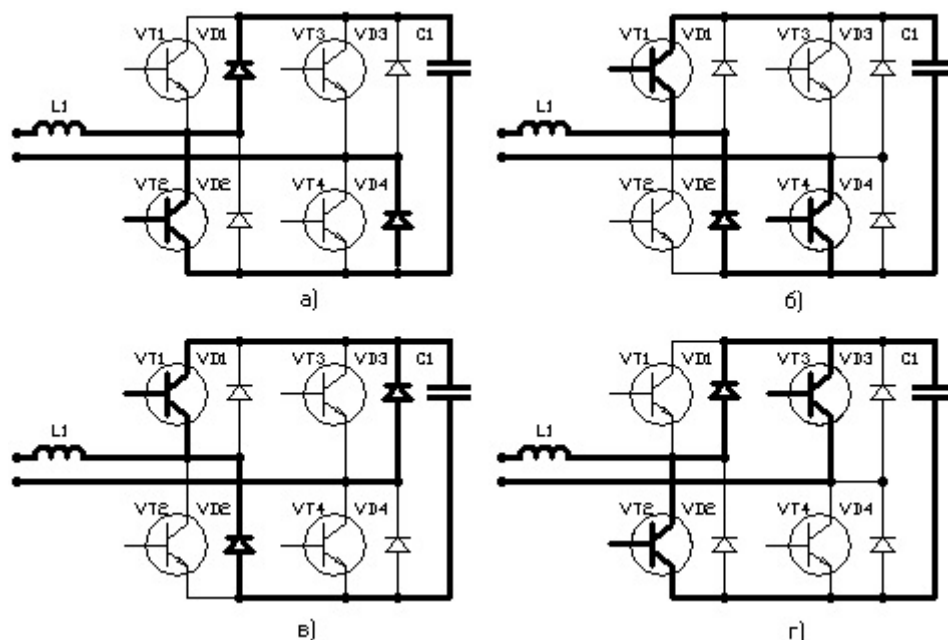


Рис. 3.

### Работа системы управления

Напряжение с датчика входного напряжения (Д1) (рис.1) подается на компаратор (К1), где

сравнивается с напряжением нулевого уровня. Напряжение с выхода К1 поступает на формирователь импульсов (ФИ1), который формирует

© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

сигналы управления НЧ ключами VT3 и VT4, работающих поочередно (рис.2,  $U_{упрVT3}(t)$  и  $U_{упрVT4}(t)$ ). Это же напряжение синхронизирует работу генератора опорного синусоидального напряжения (ГОСН). С выхода ГОСН снимается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды по частоте и фазе совпадающее с напряжением источника питания. Опорное напряжение поступает на один из входов модулятора (М). На второй вход М поступает модулирующее напряжение (напряжение обратной связи канала коррекции амплитуды входного тока), которое пропорционально среднему значению напряжения на накопительном конденсаторе С1. Данное напряжение снимается с датчика Д3 и регулируется пропорционально-интегральным регулятором Р. Из выходного напряжения модулятора вычитается напряжение, пропорциональное напряжению датчика тока источника (Д2). Сигнал ошибки, снимаемый с сумматора, подается на компаратор К2. Ширина зоны нечувствительности гистерезисной характеристики компаратора определяет максимальную величину отклонения входного тока от синусоидальной формы. Сигналы с выхода компаратора поступают на формирователь импульсов (ФИ2), формирующий сигналы управления ВЧ транзисторами VT1 и VT2, работающих в противофазе (рис.3,  $U_{упрVT1}(t)$  и  $U_{упрVT2}(t)$ ).

Как видно из временных диаграмм приведенных на рис.2, при формировании сигналов управления ВЧ транзисторами необходимо определять моменты времени  $t1 - t4$ . Это требует использования цепей сравнения токов нагрузки и источника. Альтернативным способом решения этой задачи является непрерывная подача сигналов управления на транзисторы VT1, VT2 (рис.2,  $U_{упрVT1}(t)$  и  $U_{упрVT2}(t)$ ).

#### Моделирование электромагнитных процессов

В данной статье приведены результаты исследования электромагнитных процессов в схеме для квазиустановившегося режима и для скачкообразного наброса нагрузки.

Электромагнитные процессы были исследованы при ненулевых начальных условиях.

Для исследования электромагнитных процессов был использован пакет TCad 6.2.

TCad-модель устройства приведена на рис.4.

Краткое описание элементов, используемых в TCad-модели приведено в табл.1. При проведении исследования модель системы управления постепенно усложнялась. На первом этапе была проведена симуляция электромагнитных процессов в компенсаторе, содержащем лишь канал формирования синусоидальной формы входного тока. Результаты моделирования показали, что при изменении уровня выходной мощности компенсатора необходимо перестраивать уровень опорного синусоидального напряжения в системе управления для поддержания требуемой формы входного тока. Поэтому на втором этапе была разработана двухконтурная модель компенсатора, в которую был введен второй канал регулирования, обеспечивающий адаптацию уровня опорного синусоидального напряжения, в зависимости от мощности нагрузки.

Такая TCad-модель содержит модель компенсатора и DRC-нагрузки со скачкообразно изменяемым сопротивлением резистора. Модель компенсатора состоит из силовой части и системы управления.

Система управления в свою очередь содержит два канала: канал формирования формы входного тока и канал формирования амплитуды входного тока.

Результаты исследования приведены на рис.5. в виде временных диаграмм токов и напряжений.

Электромагнитные процессы в схеме были исследованы при следующих параметрах и начальных условиях: интервал исследования 200мс; шаг исследования 0.01 мс; амплитуда напряжения сети 311 В; частота напряжения питающей сети 50 Гц; внутреннее сопротивление питающей сети 0.1 Ом; активное сопротивление ключевых элементов схемы в открытом состоянии 0.3 Ом, в закрытом состоянии 0.1 Мом; активное сопротивление нагрузки 55 Ом ( $0 < t < 100$ мс), 5 Ом ( $100 < t < 200$ мс); величина емкости фильтрующего конденсатора в цепи нагрузки 5000 мкФ; величина индуктивности дросселей 1.5мГн; величина емкости накопительного конденсатора в преобразователе компенсатора 8000 мкФ; начальное напряжение на фильтрующем конденсаторе 0 В; начальное напряжение на накопительном конденсаторе 700 В; начальная величина тока дросселя 0 А.

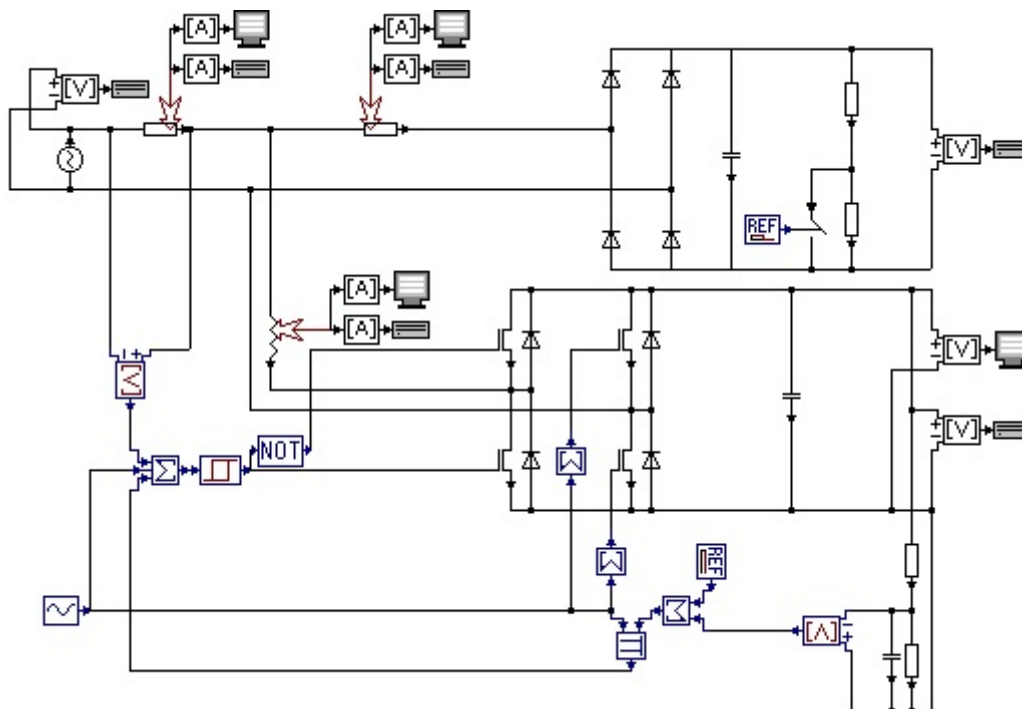


Рис. 4.

Таблица 1

Элемент	Название	Элемент	Название
	Датчик напряжения		Трехвходовый сумматор
	Источник опорного напряжения		Умножитель
	Источник скачкообразного напряжения		Логический элемент «нет»
	Компаратор		Вольтметр, выводящий информацию на экран
	Указатель цепи съема тока		Амперметр, выводящий информацию на экран
	Двухвходовый сумматор		Амперметр, выводящий информацию в файл
	Одновходовый сумматор		Вольтметр, выводящий информацию в файл

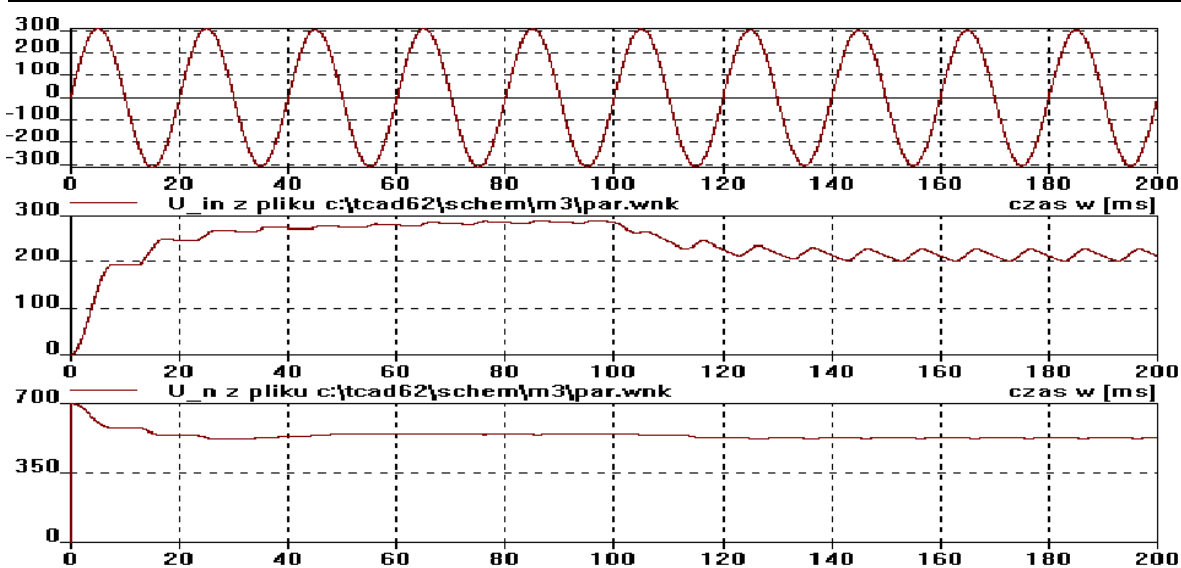


Рис. 5.



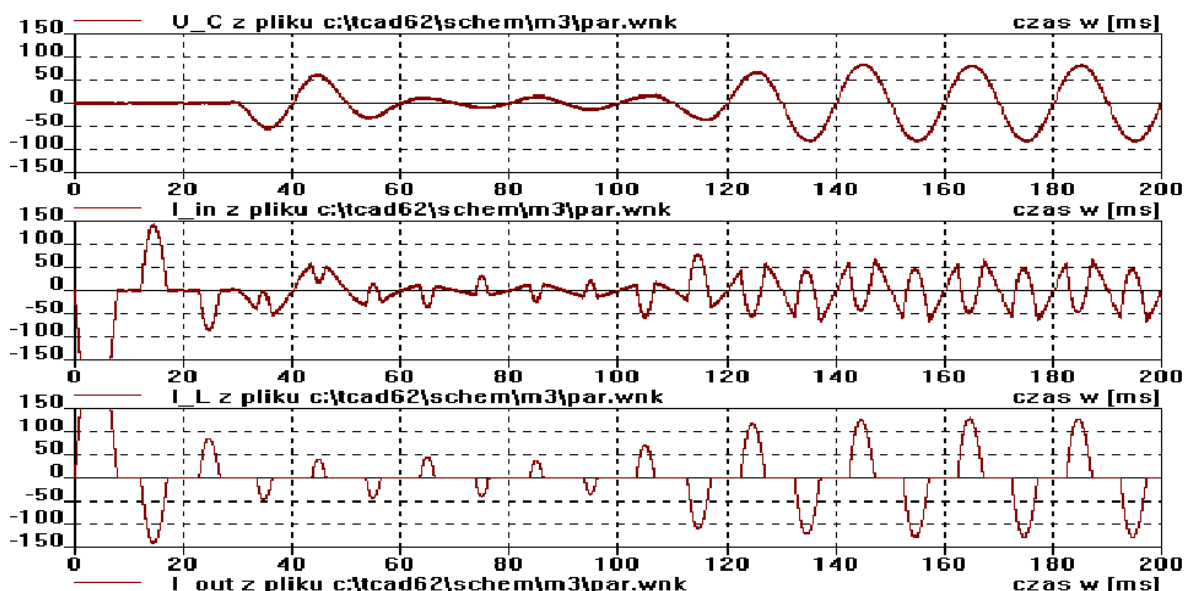


Рис. 5 (продолжение)

## Выводы

Для обеспечения синусоидальной формы тока, потребляемого от источника электроэнергии, система управления параллельного компенсатора должна содержать контуры формирования формы тока и адаптации его амплитуды, в зависимости от величины мощности нагрузки.

В начальный момент времени, после подключения нагрузки, ток заряда фильтрующей емкости может превысить максимально допустимый ток должна содержать контуры форми-

рования формы тока и адаптации его амплитуды, в зависимости от величины мощности нагрузки.

В начальный момент времени, после подачи напряжения питания на параллельный компенсатор, ток заряда накопительной емкости может превысить максимально допустимый ток компенсатора. Для исключения аварийных режимов работы, в систему управления необходимо вводить цепи ограничения тока заряда накопительного конденсатора компенсатора

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Булатов О.Г. Принципы построения быстродействующих компенсаторов реактивной мощности [Текст] / О.Г. Булатов, В.А. Шитов, Электротехника.-1989.-№7.-с.5-9.
2. Глушков В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий [Текст]/ В.М Глушков, В.П. Грибин – М.: Энергия, 1975. - 104с.
3. Константинов Б.А. Коэффициент мощности и способы его улучшения на промышленных предприятиях.
4. Поспелов Г.Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах. - 1983.
5. Todorenko V.A., Nguyen Lu Hai Tung, Rusinski J. A power factor conditioner with uninterruptible power supply capability. 4 Szkola – Konferencja Elektrotechnika Prady Niesinusoidalne. 18 – 20 czerwca 1998 Zielona Gora.
6. Strzelecki. A new method of alternating voltage control with utilised series active power filter. 2nd International Scientific and Technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical systems. 15 – 17 December 1996 Szczecin and Miedzyzdroje, Poland.

## REFERENCES

1. Bulatov O.G. *Printsipy postroeniya bystrodeystvuyushchikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti* [Principles of construction of high-speed reactive power compensators]. Elektrotehnika Publ., 1989, no. 7, pp. 5-9.
2. Glushkov V.M., Gribin V.P. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy* [Reactive power compensation in the electrical installations of industrial enterprises]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 104 p.
3. Konstantinov B.A. *Koeffitsient moshchnosti i sposoby ego uluchsheniya na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Power factor, and methods of its improvement at the industrial enterprises]
4. Pospelov G.E. *Kompensiruyushchie i reguliruyushchie ustroystva v elektricheskikh sistemakh* [Compensating and control devices in electrical systems]. 1983.
5. Todorenko V.A., Nguyen Lu Hai Tung, Rusinski J. A power factor conditioner with uninterruptible power supply capability. 4 Szkola – Konferencja Elektrotechnika Prady Niesinusoidalne. 18 – 20 czerwca 1998 Zielona Gora.
6. Strzelecki. A new method of alternating voltage

Поступила в печать 29.04.2013.

control with utilised series active power filter. 2nd International Scientific and Technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical systems. 15 – 17 December 1996 Szczecin and Miedzyzdroje, Poland.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Гончаров Ю. П.*

В статье рассмотрен параллельный ВЧ компенсатор реактивной мощности с выходом на переменном токе. Показаны преимущества и недостатки параллельных и последовательных ВЧ компенсаторов реактивной мощности. Подана функциональная схема параллельного ВЧ компенсатора реактивной мощности с выходом на переменном токе. Описана силовая часть схемы и ее работа на интервалах; структура и функционирование системы управления ВЧ компенсатором. Приведены результаты исследования с использованием среды TCad 6.2 электромагнитных процессов в схеме для квазистационарного режима и для скачкообразного наброса нагрузки при ненулевых начальных условиях. Приведены схема TCad-модели и короткое описание ее элементов.

**Ключевые слова:** электромагнитный процесс, реактивная мощность, компенсатор, высокая частота, моделирование.

УДК 621.311

В. А. ТОДОРЕНКО, С. К. ВАСИЛЕНКО (НТУУ «КПІ»)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, тел.: (044) 454-94-32, ел. пошта: [ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua) [hte@el.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:hte@el.ntu-kpi.kiev.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ПАРАЛЕЛЬНОМУ ВЧ КОМПЕНСАТОРІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СЕРЕДОВИЩІ TCAD 6.2

У статті розглянуто паралельний ВЧ компенсатор реактивної потужності з виходом на змінному струмі. Показано переваги і недоліки паралельних і послідовних ВЧ компенсаторів реактивної потужності. Подана функціональна схема паралельного ВЧ компенсатора реактивної потужності з виходом на змінному струмі. Описана силова частина схеми і її робота на інтервалах; структура і функціонування системи управління ВЧ компенсатором. Наведено результати дослідження з використанням середовища TCad 6.2 електромагнітних процесів у схемі для квазіустановленого режиму і для стрибкоподібного набросу навантаження при ненульових початкових умовах. Наведено схема TCad – моделі і короткий опис її елементів.

**Ключові слова:** електромагнітний процес, реактивна потужність, компенсатор, висока частота, моделювання.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Гончаров Ю. П.*

UDC 621.311

V. A. TODORENKO, S. K. VASILENKO (NTU "KPI")

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 03056, Kyiv, 37 Peremogy Ave, tel.: (044) 454-94-32, e-mail: [ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua) [hte@el.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:hte@el.ntu-kpi.kiev.ua)

## INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN PARALLEL RF REACTIVE POWER COMPENSATOR IN TCAD 6.2 ENVIRONMENT

The article describes the parallel HF reactive power compensator with access to the AC. The advantages and disadvantages of parallel and serial HF reactive power compensators. Filed a functional diagram of the parallel RF reactive power compensator with access to the AC. Described power of the circuit and its work at intervals, and the structure and functioning of the control system HF compensator. The results of studies of the environment using 6.2 TCad electromagnetic processes in the scheme for quasi-steady mode and load-on for non-zero initial conditions. Presents a schematic diagram TCad model and a short description of its elements.

**Keywords:** electromagnetic process, reactive power, compensator, high frequency, simulation.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Goncharov U. P.*

© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013