

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КОМПЕНСАТОРА

© 2015

А.А. Шевцов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника»

Е.С. Глибин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: энергосбережение; полупроводниковый компенсатор; реактивная мощность; аварийные режимы; имитационное моделирование; *MATLAB Simulink*, контактная сварка.

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению аварийных ситуаций в работе полупроводникового компенсатора. Рассмотрены возможные последствия возникновения аварийных ситуаций. Определены основные аварийные режимы, которые могут возникнуть в системе «промышленная питающая сеть – статический полупроводниковый компенсатор – нагрузка». Показаны основные пути предсказания поведения системы в аварийных режимах и граничных режимах, близких к аварийным. В качестве примера электротехнологической нагрузки в рассматриваемой системе взят источник питания однофазной контактной машины переменного тока для точечной сварки, применяемый в автомобильной промышленности при производстве деталей кузова, в машиностроении. Проведено имитационное моделирование в системе *MATLAB Simulink*. Представлена и описана схема компьютерной модели электротехнической системы, описаны использованные математические выражения для вычисления компенсирующего тока. Приведены результаты моделирования в виде временных диаграмм при отсутствии компенсации, в нормальном режиме работы компенсирующего устройства и в аварийных режимах: при коротком замыкании в нагрузке, при коротком замыкании в полупроводниковом ключе инвертора напряжения компенсатора, при холостом ходе нагрузки, при холостом ходе ключа инвертора напряжения компенсатора. Предложены пути защиты компенсатора и его нагрузки в таких режимах и сделаны выводы о возможности их обработки средствами системы управления компенсатором. Показана необходимость совместного применения традиционных средств защиты, например автоматических выключателей, при коротком замыкании в нагрузке. Описаны возможные действия системы управления компенсирующим устройством для безопасной обработки короткого замыкания одного ключа инвертора напряжения, а также режимов холостого хода нагрузки или ключа компенсатора.

Статический полупроводниковый компенсатор неактивных составляющих полной мощности, как и любое другое устройство, может либо сам вызывать аварийные ситуации в системе электроснабжения вследствие различных сбоев и неисправностей внутри схемы компенсатора, либо работать в аварийных условиях, возникающих в системе «сеть – компенсатор – нагрузка» [1]. Выход из строя компенсирующего устройства приводит к нарастанию потребляемого от источника питания действующего тока той или иной нагрузки, негативное влияние на сеть которой устранял компенсатор, что является зачастую неприемлемым при питании мощных электротехнических установок [2]. При работе всей системы в режимах, близких к граничным, ситуация чревата резким повышением токовой нагрузки на коммутирующую и энергопреобразующую аппаратуру [3; 4]. В связи с этим возникает необходимость предсказания поведения компенсирующих устройств и моделирования их работы в аварийных режимах.

Традиционно, подобные задачи решаются двумя способами: это искусственное введение в аварийный режим работы реальной системы и имитационное моделирование процессов, протекающих в электрической системе с помощью пакетов имитационного моделирования [5–7]. Первый путь, хотя и наглядный, но достаточно дорогостоящий в силу высокой вероятности выхода из строя тех или иных силовых полупроводниковых приборов, а в худшем случае и системы управления. Снизить и даже полностью устранить материальные потери на этапе испытаний помогает имитационное моделирование.

Рассмотрим компьютерную модель компенсатора, разработанную в программе *MATLAB Simulink* [8; 9]. Модель имеет иерархическую структуру, состоящую из нескольких подсистем: подсистемы моделирования сети, силовой части компенсатора, его системы управления, нагрузки. Самый верхний уровень модели представлен на рис. 1.

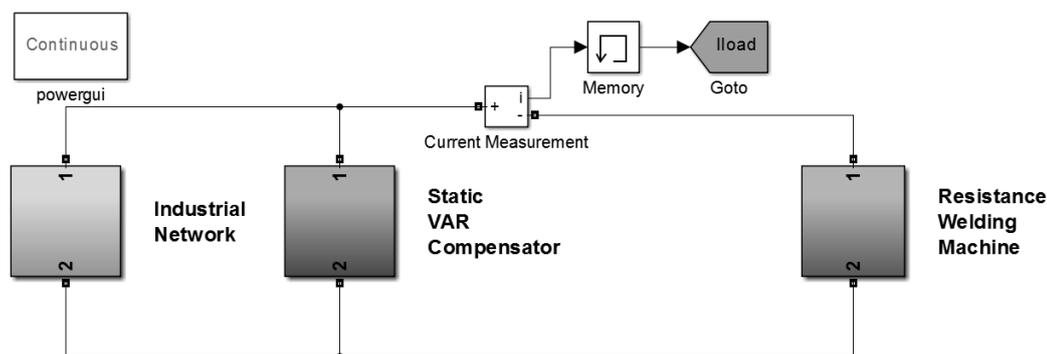


Рис. 1. Модель системы «сеть – компенсатор – нагрузка» в *MATLAB Simulink*

Моделируется промышленная сеть с помощью подсистемы *Industrial Network*, которая включает в себя источник переменного напряжения 380 В, 50 Гц и измерительные блоки параметров сети, например, потребляемого тока.

Для исследования аварийных режимов в качестве нагрузки использована модель однофазной точечной контактной машины переменного тока [10–14]. Упрощенная схема источника питания представлена на рис. 2. Изменением угла включения тиристора *VS1* и *VS2* (в зависимости от направления протекания тока) регулируется средняя величина тока *I_{св}*, а следовательно, мощность, передаваемая в свариваемые детали.

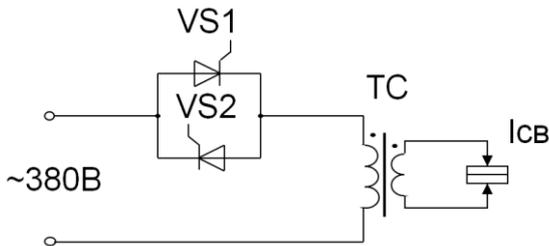


Рис. 2. Упрощенная схема рассматриваемого источника питания контактной машины

На рис. 3 приведены временные диаграммы сетевого напряжения и тока источника питания машины при угле управления 100°.

Рассмотрим упрощенную типовую структуру параллельного полупроводникового компенсатора (рис. 4), описанную в [15].

Он состоит из системы управления, инвертора напряжения, дросселя *L* и энергонакопительного конденсатора *C*. На временных диаграммах, представленных на рис. 5, видно, что при работе компенсирующего устройства максимальный ток, потребляемый из сети, уменьшается в 3 раза и становится почти синусои-

дальным и синфазным сетевому напряжению, а следовательно, потребляемая мощность – практически пол-

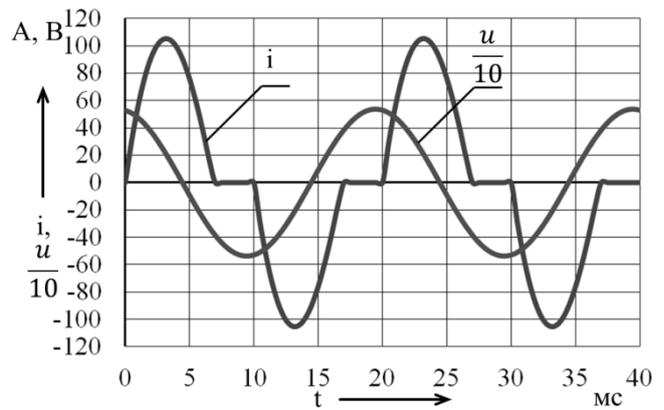


Рис. 3. Временные диаграммы работы нагрузки

ностью активной. Это позволяет уменьшать расчетные Мощности энергоснабжающего оборудования при питании электротехнических установок [16–18]. Мгновенные значения компенсационного тока *i_c(t)* рассчитывались согласно следующей формуле [19; 20]:

$$i_c(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot u(t) - i(t),$$

где *u(t)* – мгновенные значения сетевого напряжения; *i(t)* – мгновенные значения тока нагрузки; *T* – период сетевого напряжения.

Как видно из рис. 1, 4, аварийные ситуации могут проявиться в виде короткого замыкания со стороны

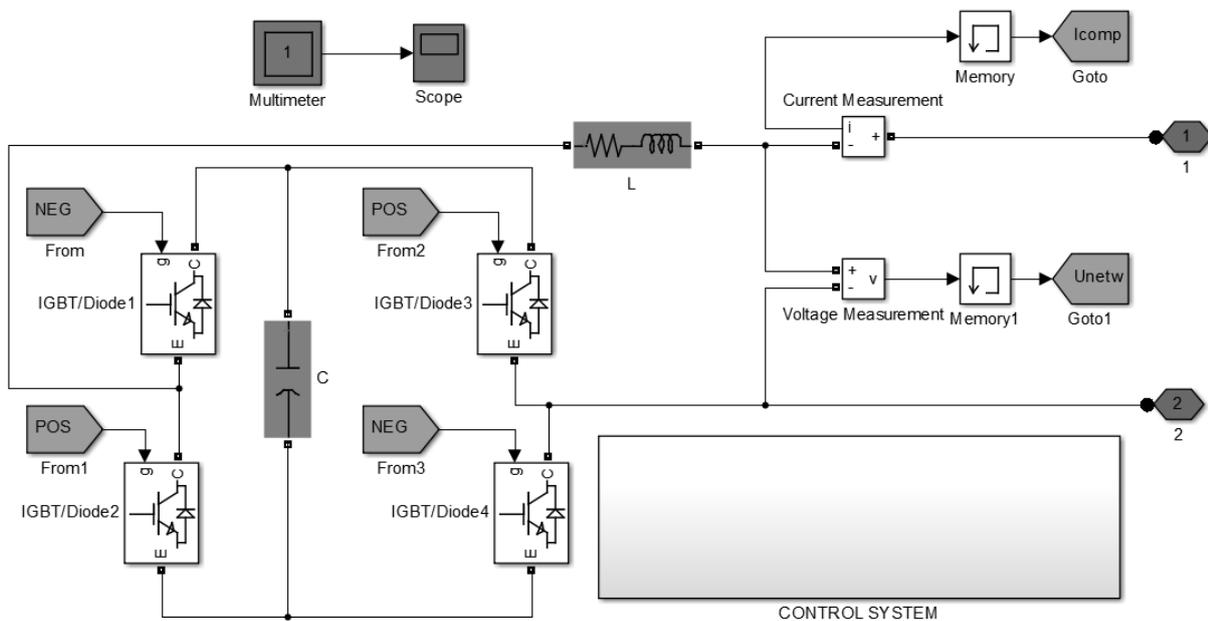


Рис. 4. Упрощенная структура типового полупроводникового компенсирующего устройства

нагрузки, короткого замыкания выводов полупроводникового преобразователя, обрыва цепей в точке подключения компенсатора, короткого замыкания вследствие пробоя или других причин выводов силовых ключей (транзисторов) и обрыва цепей транзисторов.

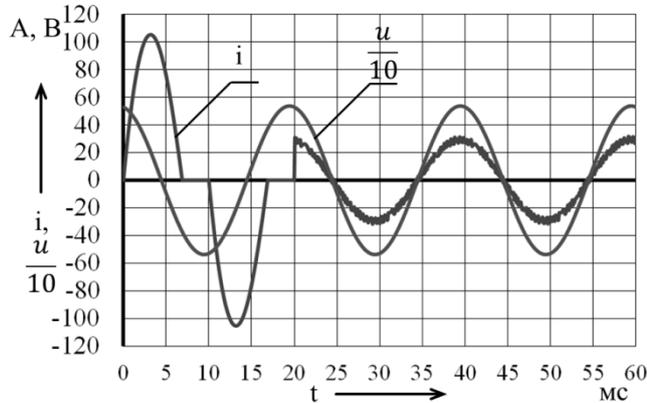


Рис. 5. Сетевое напряжение и потребляемый из сети ток при нормальном функционировании компенсирующего устройства

Рассмотрим более подробно поведение модели компенсатора в этих ситуациях в следующем порядке: 1. В нагрузке произошло короткое замыкание; 2. Один из ключей моста инвертора компенсатора вышел из строя, не реагирует на управляющие сигналы системы управления, его сопротивление стремится к нулю; 3. Произошло отключение нагрузки от компенсатора во время работы системы; 4. Один из ключей моста инвертора

компенсатора вышел из строя, его проводимость стремится к нулю.

На рис. 6 приведены временные диаграммы при коротком замыкании в нагрузке. В качестве нагрузки взята модель точечной контактной сварочной машины при сварке двух листов стали, описанная в [7]. С нулевого момента времени до $t=20$ мс компенсирующее устройство отключено. В момент времени $t=20$ мс компенсатор включается и устраняет негативное влияние энергопотребителя на сеть. Затем в $t=35$ мс происходит авария – выводы нагрузки соединяются через низкоомный резистор (номинал 0,1 Ом), что моделирует режим короткого замыкания и приводит к резкому возрастанию потребляемого тока. Видно, что вследствие стандартной реакции системы управления на аварию как на рабочий режим ток компенсирующего устройства повышается примерно в два раза. В то же время на графике тока нагрузки видно, что компенсатор не защищает ее от короткого замыкания и не заменяет собой традиционные средства защиты. Следовательно, для защиты компенсирующего устройства от короткого замыкания в нагрузке достаточно традиционных средств защиты энергопотребителя со стороны питающей сети, например, автоматического выключателя, отключающего нагрузку, поскольку в момент аварии ток компенсатора не возрастает скачком до момента срабатывания выключателя.

На рис. 7 показаны временные диаграммы при коротком замыкании в полупроводниковом ключе инвертора напряжения (*IGBT/Diode3* [21]). В процессе имитационного моделирования происходит короткое замыкание в одном из транзисторов схемы инвертора (*VT3*). При этом наблюдается резкое повышение тока через *Lк*. С одной стороны, ток компенсатора, протекающий через дроссель, измеряется датчиком во многих способах управления компенсатором, например, в следящем (гистерезисном) способе.

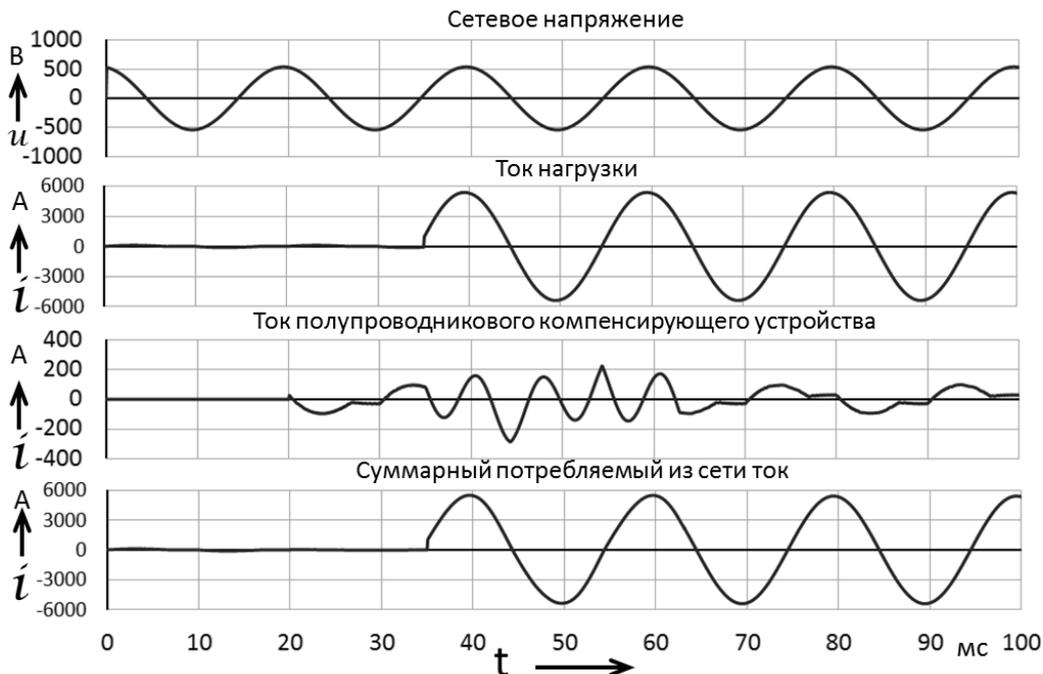


Рис. 6. Временные диаграммы работы компенсатора при коротком замыкании в нагрузке

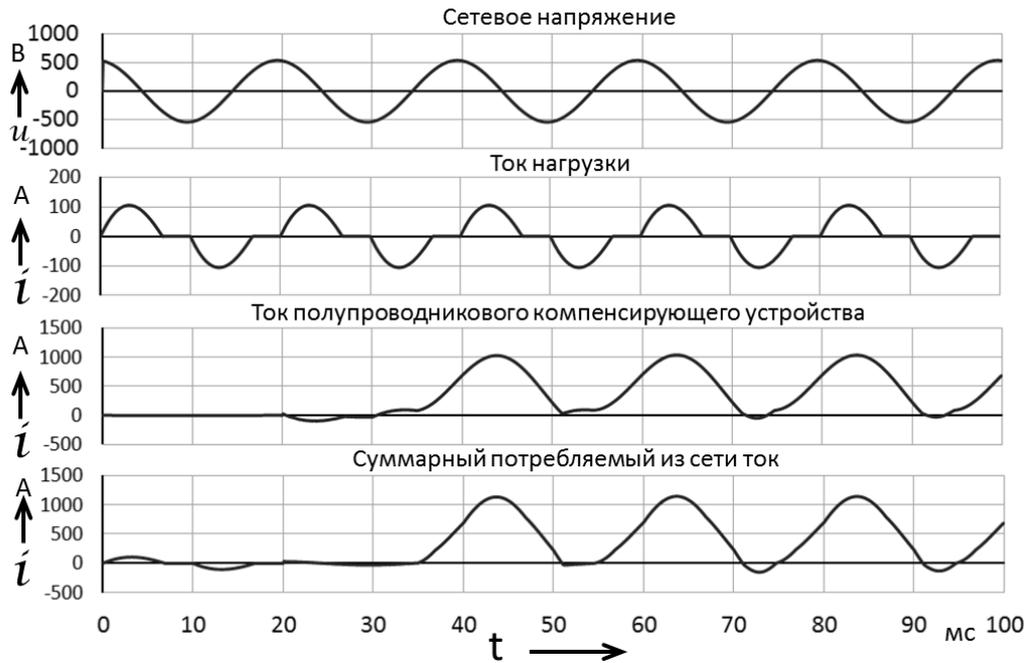


Рис. 7. Временные диаграммы работы компенсатора при коротком замыкании в полупроводниковом ключе инвертора напряжения

С другой стороны, максимальный ток компенсатора совпадает по величине с максимальным током через полупроводниковые элементы. Однако недостаточно просто отключить все ключи, когда величина тока компенсатора превышает некоторую часть паспортной величины максимального тока полупроводникового прибора. В этом случае обратные диоды ($VD1, VD2$) оказываются подключенными к сетевому напряжению через дроссель L_k , на котором при скачках тока возникают перенапряжения, суммирующиеся

с сетевым, и возникает вероятность выхода из строя элементов компенсатора из-за превышения обратными напряжениями на диодах допустимой величины. Необходимо отключать всю схему инвертора напряжения от сети при превышении данного порога, что приводит к необходимости разработки схем подключения полупроводникового компенсатора к нагрузке с учетом аварийных режимов работы.

На рис. 8 показаны временные диаграммы при холостом ходе нагрузки.

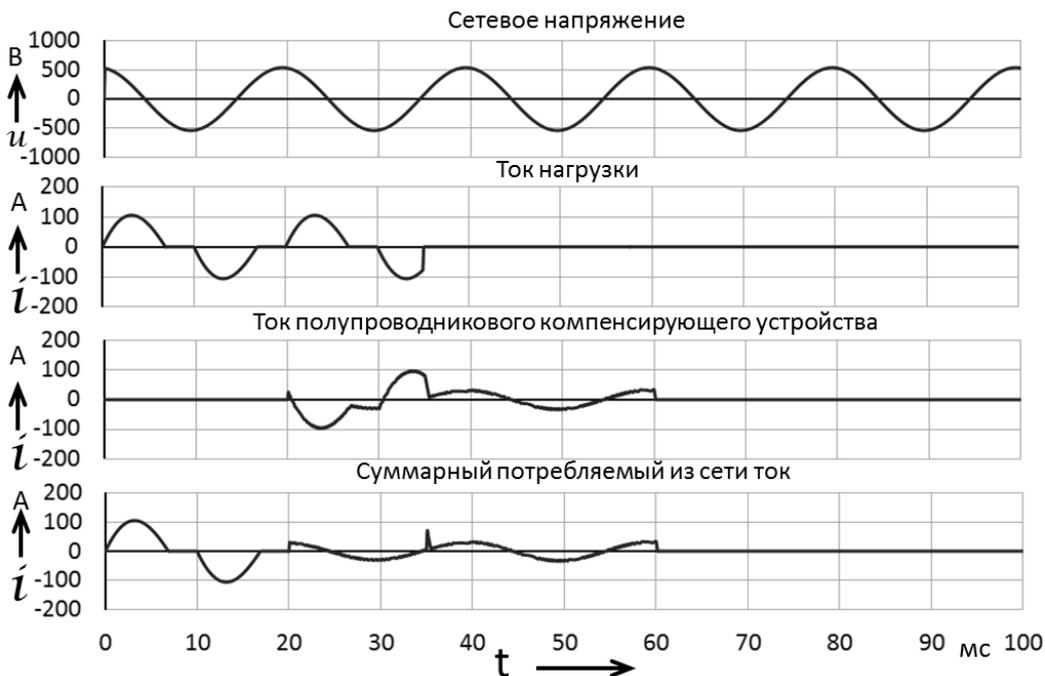


Рис. 8. Временные диаграммы работы компенсатора при холостом ходе нагрузки

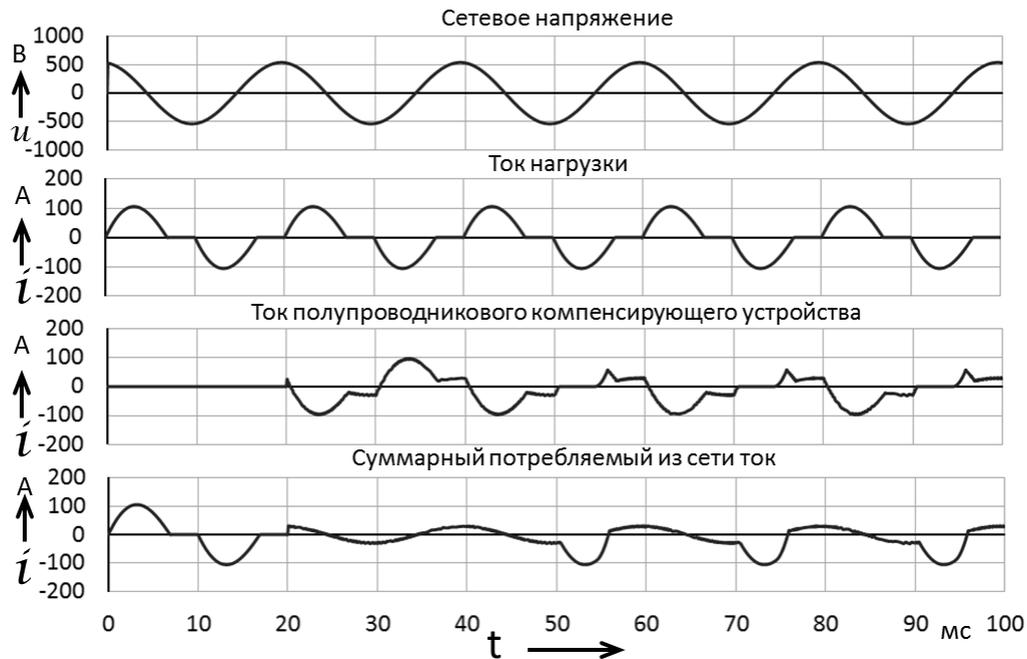


Рис. 9. Временные диаграммы работы компенсатора при холостом ходе ключа инвертора напряжения

Видно, что, несмотря на отсутствие опасных для приборов токов, происходит излишняя перекомпенсация, которая может быть устранена использованием способов расчета компенсационного тока с учетом особенностей нагрузки, поскольку на основе общих методов расчета невозможно сказать, чем вызвана токовая пауза в нагрузке: технологическими особенностями или режимом холостого хода.

На рис. 9 показаны временные диаграммы работы компенсатора при холостом ходе ключа инвертора напряжения (*IGBT/Diode3* [21]).

В этом случае достаточно системе управления отключать все ключи или все компенсирующее устройство при длительном отсутствии реакции на управляющие импульсы.

Таким образом, в результате имитационного моделирования получены кривые токов компенсатора при различных аварийных ситуациях. Очевидно, что с одной стороны компенсатор должен иметь в своем составе традиционные защитные средства в виде различных предохранителей и автоматических выключателей. Однако сохранить работоспособность либо всего компенсатора, либо его не пострадавших элементов можно с помощью системы управления компенсатором, заложив реакции на скачкообразные изменения токов и напряжений на уровне алгоритмов функционирования системы управления, такие как отключение силовой части преобразователя от питающей сети при превышении порогового значения напряжения на обратных диодах, а также принудительное закрытие силовых ключей при длительном отсутствии реакции на команды управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Имитационное моделирование совместной работы статических компенсаторов и контактной сварочной машины // *Электротехника*. 2010. № 4. С. 34–38.

2. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний // *Наука – производству*. 2004. № 4. С. 46–47.
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.
4. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышения качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
5. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. М.: Горячая Линия-Телеком, 2009. 816 с.
6. Певчев В.П. Использование программы MICRO CAP при моделировании процесса срабатывания импульсных электромеханических устройств // *Электротехника*. 2010. № 4. С. 55–59.
7. Глибин Е.С., Шевцов А.А. Моделирование функционирования компенсационных устройств совместно с контактными сварочными установками // *Сварочное производство*. 2009. № 5. С. 17–21.
8. Дзэни Дж., Харман Т. Simulink 4. Секреты мастерства. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
10. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Источник питания контактной сварочной машины : патент на изобретение № 2421311 от 08.04.2009.
11. Климов А.С. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки. Тольятти: ТГУ, 2004. 170 с.
12. Машиностроение. Т. IV-6. Оборудование для сварки / В.К. Лебедев [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.
13. Банов М.Д. Технология и оборудование контактной сварки. М.: Академия, 2005. 224 с.
14. Глибин Е.С., Шевцов А.А. Ценовые аспекты выбора компенсатора неактивных составляющих мощности

при работе с контактными сварочными машинами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. № 2. С. 152–158.

15. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
16. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Вибрационный источник крутильных колебаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 56–59.
17. Ивашин В.В., Медведев В.А., Позднов М.В. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2177840 от 10.12.1999.
18. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
19. Агунов М.В., Шевцов А.А. Способ динамической компенсации неактивных составляющих мощности : патент РФ № 2103779 от 27.01.1998.
20. Агунов М.В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. Кишинев: МолдНИИТЭИ, 1997. 84 с.
21. Дьяконов В.П. Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения. М.: Солон-Пресс, 2008. 800 с.
8. Debni Dzh., Kharman T. *Simulink 4. Sekrety masterstva* [Simulink 4. Secrets of skill]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy publ., 2003, 403 p.
9. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovih sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semiconducting systems in MATLAB 6.0]. S. Peterburg, Korona print publ., 2001, 320 p.
10. Shevtsov A.A., Glibin E.S. *Istochnik pitaniya kontaktной svarochnoy mashiny* [Power supply of contact welding machine]. Patent RF, no. 2421311, 2009.
11. Klimov A.S. *Osnovi tekhnologii i postroeniya oborudovaniya dlya kontaktной svarki* [Principles of technology and development of equipment for contact welding]. Tolyatty, Tolyattinskiy gos. universitet publ., 2004, 170 p.
12. Lebedev V.K. et al. *Mashinostroenie. Tom IV-T. Oborudovanie dlya svarki* [Mechanical engineering. T. IV-6. Welding equipment]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1999, 496 p.
13. Banov M.D. *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktной svarki* [Technologies and equipment for contact welding]. Moscow, Akademiya publ., 2005, 224 p.
14. Slibin E.S., Shevtsov A.A. The Price-Based Aspects of Non-Active Power Compensator Selection for Contact Welding. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 2, pp. 152–158.
15. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v slozhnih elektricheskikh sistemah* [Reactive power compensation in complex electrical systems]. Moscow, Energoizdat publ., 1981, 200 p.
16. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. Vibrating source of rotary fluctuations. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 56–59.
17. Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pozdnov M.V. *Rezonansnyy vibrator* [Resonance vibrator]. Patent RF no. 2177840, 1999.
18. Zhezhelenko I.V. *Visshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya predpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of the enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1984, 160 p.
19. Agunov M.V., Shevtsov A.A. *Sposob dinamicheskoy kompensatsii neaktivnih sostavlyayushchih moshchnosti* [Method of dynamic compensation of inactive power components]. Patent RF no. 2103779, 1998.
20. Agunov M.V. *Energeticheskie protsessy v elektricheskikh tsepyah s nesinusoidalnimi rezhimami i ih effektivnost* [Energy processes in electrical circuits with non-sinusoidal modes and their efficiency]. Kishinev, MoldNIITEI publ., 1997, 84 p.
21. Dyakonov V.P. *Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Osnovi primeneniya* [Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Principles of use]. Moscow, Solon-Press publ., 2008, 800 p.

REFERENCES

1. Shevtsov A.A., Glibin E.S. Simulation modeling of joint operation of static compensators and contact welding machine. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 34–38.
2. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. Electromagnetic vibrator with controlled vibration frequency. *Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 46–47.
3. Zhezhelenko I.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii na promishlennih predpriyatiyah* [Quality indicators of electric power at the industrial enterprises]. Moscow, Energiya publ., 1977, 128 p.
4. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti i povisheniya kachestva elektroenergii* [Reactive power compensation and electric power quality improvement]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1985, 224 p.
5. Dyakonov V.P., Penkov A.A. *MATLAB i Simulink v elektroenergetike* [MATLAB and Simulink in power industry]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom publ., 2009, 816 p.
6. Pevchev V.P. Application of MICRO CAP software when simulating the process of actuation of impulse electro-mechanical. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 55–59.
7. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Simulation of functioning of compensating devices jointly with the contact welding machines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 5, pp. 17–21.

THE RESEARCH OF EMERGENCY MODES OF THE SEMICONDUCTING COMPENSATOR

© 2015

A.A. Shevtsov, candidate of technical sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Industrial Electronics

E.S. Glibin, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: energy saving; semiconducting compensator; reactive power; emergency modes; simulation modeling; *Matlab Simulink*; contact welding.

Annotation: The article covers the study of emergency situations in the work of semiconducting compensator. The authors considered potential impact of emergency situations, determined the main emergency modes that may arise in the system "industrial supply mains - static semiconducting compensator - load", and showed the basic ways of prediction of system behavior under the emergency conditions and boundary conditions close to the emergency. A single-phase power supply of contact AC machine for spot welding used in the automotive industry when manufacturing the body parts in mechanical engineering is considered to be an example of electro-process load in the system. The authors performed a simulation modeling in the *Matlab Simulink* system. The article presents and describes the diagram of electrical system computer model, describes mathematical expressions for calculation of compensating current. The authors give the simulation results in the form of flow diagrams in the absence of compensation, in normal operation of compensating device, and in emergency modes: short-circuit in the load, short-circuit in the semiconducting switch of the compensator voltage inverter, at idle load, and at no-load of inverter switch of compensator voltage. The article presents the ways of protection of compensator and its load in such modes, and makes the conclusions about the possibility of their processing using the facilities of compensator management system. The authors prove the necessity of joint use of such traditional protection facilities as circuit breakers under the conditions of short-circuit in the load. The article describes possible behavior of the control system of compensating device for safe processing of short-circuit of one inverter voltage switch, as well as the modes of no-load or compensator switch.