

В. С. Бомбик**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СЕТЕВЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Разработана компьютерная модель, в которую заложен усовершенствованный закон управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения солнечного модуля, позволяющий удерживать режим работы солнечного модуля в области точки отбора максимальной мощности и учитывающий значение температуры солнечного модуля, что увеличивает его производительность. Предложена компьютерная модель регулятора продольной составляющей тока инвертора, учитывающая текущее и заданное напряжение сети и напряжение солнечного модуля, что позволяет оптимизировать работу инвертора как со стороны солнечного модуля, так и со стороны сети по напряжению. Предложена компьютерная модель регулятора поперечной составляющей тока инвертора, учитывающая заданное значение активной мощности из узла сети и заданное значение поперечной составляющей тока, которая необходима для работы инвертора в области точки отбора максимальной мощности, что позволяет оптимизировать работу инвертора по частоте.

Ключевые слова: компьютерная модель, многоуровневый инвертор напряжения, управление, солнечный модуль, температура.

Вступ

В последнее время фотоэлектрические системы приобретают все большую популярность [1, 2]. Фотоэлектрические системы могут работать как отдельные самостоятельные системы, так и совместно с сетью [3 – 5]. Фотоэлектрическая система, подключённая к сети, экономически выгодней, поскольку не требует использования батарей для накопления электрической энергии. В таких системах применяют алгоритм поиска точки отбора максимальной мощности, что повышает эффективность системы [6]. Для формирования исходного переменного напряжения в качестве согласующих устройств большую популярность получили многоуровневые сетевые инверторы напряжения. В работах [7, 8] рассматривают модели многоуровневых инверторов напряжения при работе с электроприводом в двигательном режиме работы, но в них отсутствует анализ параллельной работы инверторов с сетью, поэтому необходимо синтезировать систему управления многоуровневым инвертором, ориентированную на применение в солнечных электростанциях.

Многоуровневые инверторы напряжения при работе в солнечных электростанциях имеют две основные задачи: формирование синусоидального тока и напряжения на своем выходе для отдачи в сеть, уменьшение уровня гармоник [9].

Целью работы является компьютерное моделирование синтезированной системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения при работе в составе солнечной электростанции для установления показателей качества управления инвертором, допустимых режимов работы, вычисления параметров фильтра электромагнитной совместимости.

Результаты исследования

В системах векторного управления инверторами используют приведение трехфазной системы токов инвертора к ортогональной d-q-системе координат. При этом выходное напряжение на выходе инвертора соответственно устанавливают пропорционально продольной составляющей тока I_d , а выходную мощность обеспечивают соответствующим

значением поперечной составляющей I_q . При согласовании работы многоуровневого инвертора с сетью для отслеживания точки квазиэкстремума вольт-амперной характеристики солнечного модуля продольная и поперечная составляющие тока многоуровневого инвертора будут обеспечивать напряжение и мощность, которые будут снимать со стороны входа инвертора солнечного модуля, а со стороны выхода будут отдавать в сеть. В работе [10] отмечено, что гармоники низкого порядка сильно влияют на работу инвертора, поэтому есть смысл установить L-фильтр между выходом инвертора напряжения и сетью. Учитывая вышеописанное и структуру системы управления, представленную в работе [11], структура внутреннего контура системы управления многоуровневым инвертором и его силовая часть будет иметь вид, приведенный на рис. 1 (на примере трехуровневого инвертора). Температурную коррекцию выходной мощности солнечного силового модуля в предложенной системе обеспечивает канал измерения, состоящий из блока TS и блока CBQ.

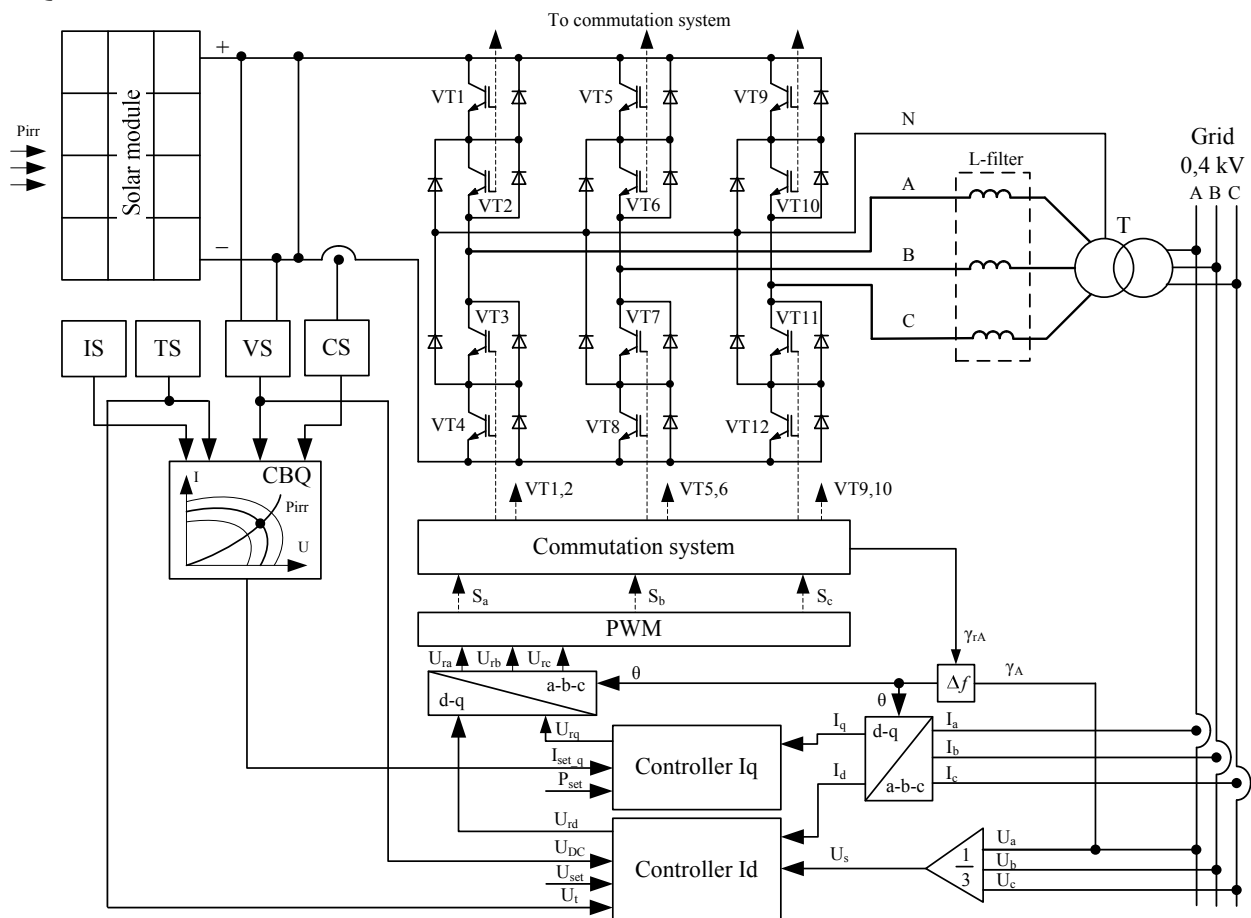


Рис. 1. Функциональная схема трехуровневого сетевого инвертора с внутренними цепями для регулирования токов I_d и I_q

На рис. 1: IS – датчик освещения; TS – датчик температуры; VS – датчик напряжения; CS – датчик тока.

Блок вычисления квазиэкстремума (CBQ) вычисляет координаты области точки отбора максимальной мощности и формирует сигнал задания по току $I_{q,зад}$ для регулятора поперечной составляющей I_q тока инвертора. Датчик выходного напряжения солнечного модуля формирует сигнал задания по напряжению U_{DC} для регулятора продольной составляющей I_d тока инвертора. Обратные связи указанных регуляторов реализуют путем перевода трехфазной системы токов I_a , I_b и I_c к ортогональной I_d и I_q . Такое преобразование

осуществляется относительно угла электромагнитной нагрузки инвертора θ , что соответствует углу нагрузки электрической машины, работающей параллельно с сетью.

Угол электромагнитной нагрузки инвертора θ вычисляет система во временном интервале как разницу частот напряжения и инвертора соответственно

$$\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt. \quad (1)$$

Разницу частот определяют во временном интервале на соответствующем промежутке как время от момента выдачи команды системой коммутации на включение ключа VT1 до момента перехода через 0 кривой напряжения (в фазе A) в положительном направлении (сигнал γ).

Блок преобразования трехфазной системы токов “a-b-c” к ортогональной “d-q” описывает система уравнений:

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ I_q = \frac{2}{3} \left(i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{cases}, \quad (2)$$

Блок обратного преобразования ортогональной системы вычисленных оптимальных значений токов I_{rd} и I_{rq} к трехфазной системе напряжений управления плечами моста инвертора U_{ra} - U_{rb} - U_{rc} работает в соответствии с системой

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin \theta + I_{rq} \cdot \cos \theta, \\ U_{rb} = \frac{1}{2} \cdot \left((\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) I_{rq} - (\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) I_{rd} \right), \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \quad (3)$$

Известно, что значение напряжения на выходе фотоэлектрических элементов солнечного модуля постоянно меняется в результате определенных факторов, а именно: погодные условия, время суток и температура панелей [12]. Состояние конденсатора батареи солнечных элементов также меняется в зависимости от того, заряжен он или разряжен. Важным фактором с точки зрения разработки системы управления инвертором является обеспечение работы солнечного модуля в области точки отбора максимальной мощности. Зависимость мощности, которую может выдать солнечный модуль на сетевой инвертор при работе с фактическим выходным напряжением, существенно зависит от температуры солнечной панели, поэтому нужно учитывать значение температуры солнечной панели в законе управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения.

Для обеспечения режима удержания солнечного модуля в точке максимальной мощности автоматические регуляторы напряжения (продольной составляющей тока инвертора I_d) и мощности (поперечной составляющей тока инвертора I_q) будут функционировать в соответствии с ПИД-законом регулирования, их описывает система уравнений [13]:

$$\begin{cases} I_{set_q} = k_p \cdot k_{g_irr} \cdot P_{irr} + k_p \cdot P_{set} + k_u \cdot U_{DC} - k_{sl} \cdot I_{DC}, \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left(k_{g_rq} \cdot (I_{set_q} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{set_q} - I_q) dt + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{set_q} - I_q)}{dt} \right) \\ I_{set_d} = k_{b_c} \cdot \left(U_{set} + U_{DC} \cdot k_{g_DC} - U_s \cdot k_{g_s} + k_t \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \right), \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left(k_{g_rd} \cdot (I_{set_d} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{set_d} - I_d) dt + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{set_d} - I_d)}{dt} \right). \end{cases}, \quad (4)$$

где k_{pd} и k_{pq} – коэффициенты усиления регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора соответственно; T_{id} и T_{iq} – постоянные времени интегрирования регуляторов; T_{dd} – постоянная времени дифференцирования канала регулирования I_d ; U_{rd} и U_{rq} – выходные сигналы регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора; k_p – коэффициент с размерностью проводимости для приведения мощности к соответствующему значению тока; k_{g_irr} – весовой коэффициент усиления значения мощности, поступающей на датчик освещения; P_{set} – заданное значение мощности солнечного модуля; k_u – коэффициент с размерностью проводимости для приведения напряжения в канале задания регулятора к соответствующему значению тока на входе измерительного органа регулятора; U_{DC} – напряжение на выходе датчика напряжения солнечного модуля; k_{sl} – коэффициент наклона регулировочной характеристики; I_{DC} – значение тока, поступающего на СВЧ с выхода датчика тока; k_{g_rq} – коэффициент усиления П-составляющей выходного напряжения U_{rq} ; k_{g_i} – коэффициент приведения сигнала напряжения к току; U_{set} – заданное значение напряжения, которое должен поддерживать солнечный модуль; U_{DC} – значение напряжения на выходе датчика напряжения; k_{g_DC} – коэффициент усиления напряжения с выхода датчика напряжения; U_s – среднее значение напряжения; k_{g_s} – коэффициент усиления значения напряжения сети; k_{s_rd} – коэффициент усиления П-составляющей напряжения U_{rd} ; T – значение температуры солнечной батареи; T_{ref} – разница температур между солнечной батареей и окружающей средой.

Рассмотренный закон управления требует уточнения коэффициентов настройки, соответствующих критериям устойчивости системы управления, определения области устойчивости работы системы, установления динамических характеристик для возможности их анализа и оптимизации в дальнейшем.

Осуществим исследование моделей регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора и проверим на устойчивость. Также с целью установления оптимальных параметров составляющих тока инвертора составим компьютерную модель (рис. 2), построенную в соответствии с синтезированным законом (4).

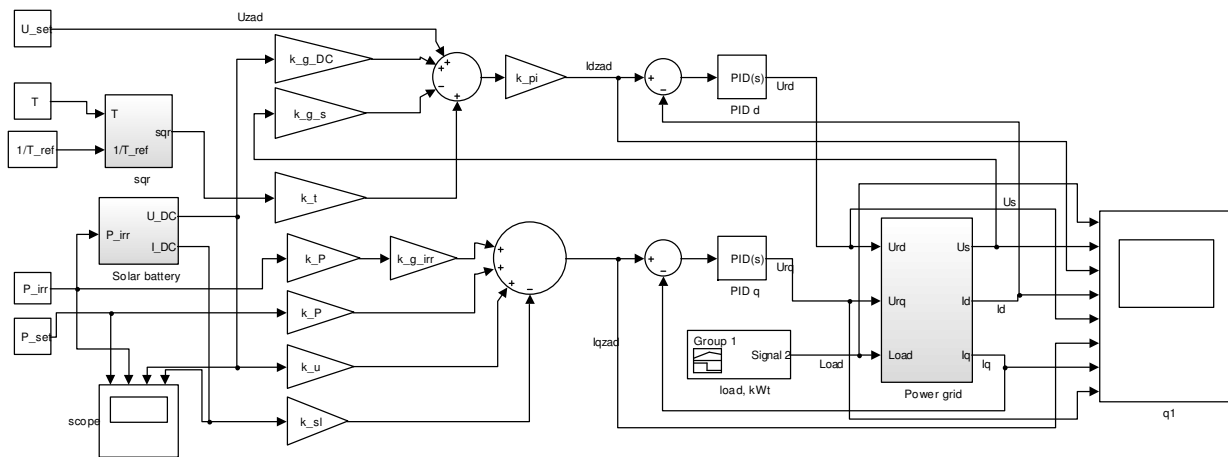


Рис. 2. Компьютерная модель для проверки адекватности работы регуляторов d и q составляющих тока инвертора

В данной модели: U_{set} – заданное значение напряжения; P_{irr} – значение мощности, воспринимаемое от освещения; P_{set} – заданное значение мощности солнечного модуля; *Solar battery* – модель солнечной батареи; sqr – квадратическое значение отношения температуры солнечной батареи к разнице температур между солнечной батареей и окружающей средой; $PID\ d$ – ПИД-регулятор продольной составляющей тока инвертора; $PID\ q$ – ПИД-регулятор поперечной составляющей тока инвертора; *load* – заданный график нагрузки; *Power grid* – модель сети.

Результаты моделирования для ПИД-регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора представлены на рис. 3.

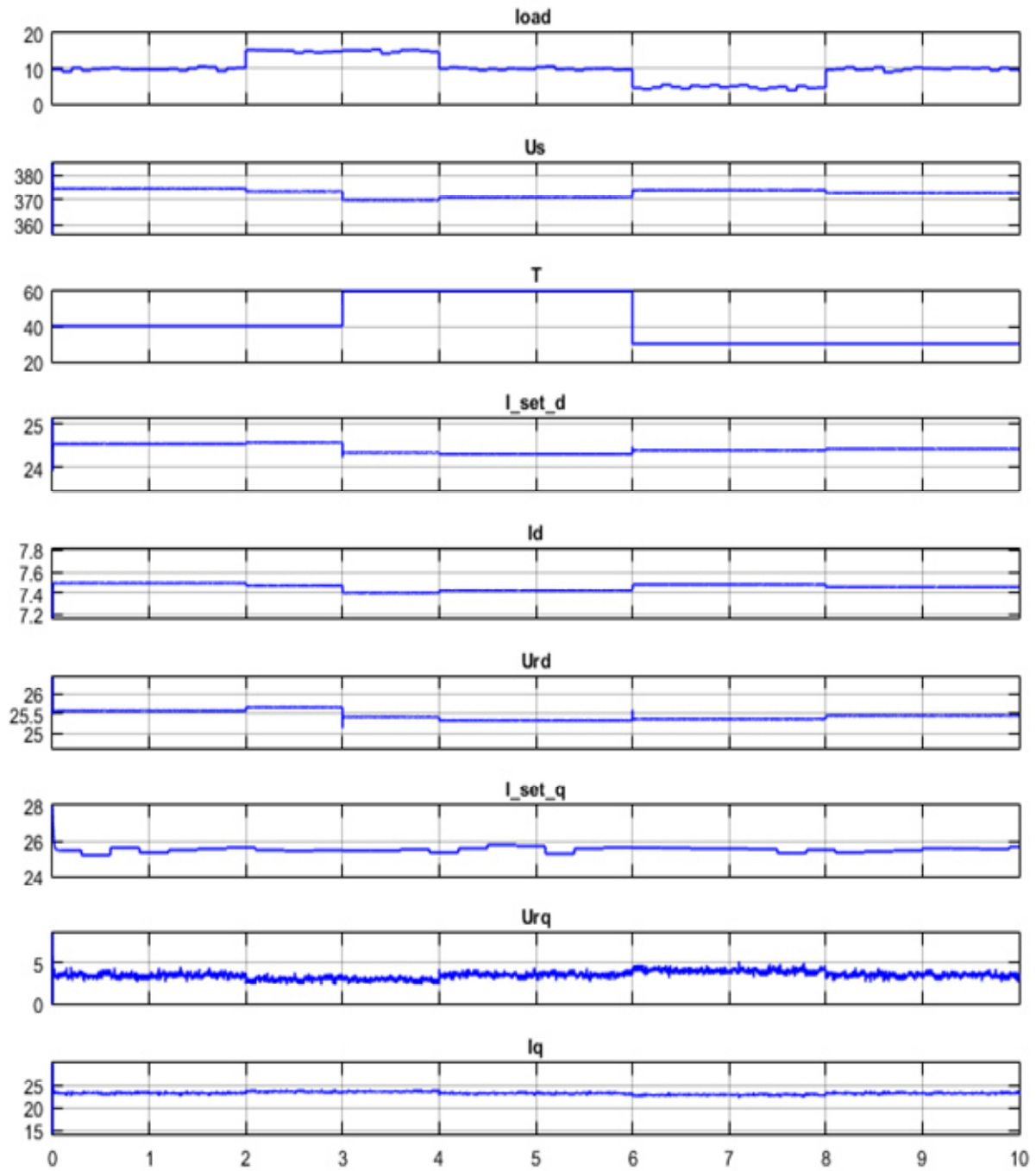


Рис. 3. Результаты моделирования для ПИД-регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора

Заданное и фактическое значения уровня освещенности, выходной ток и напряжение солнечной батареи показаны на рис. 4.

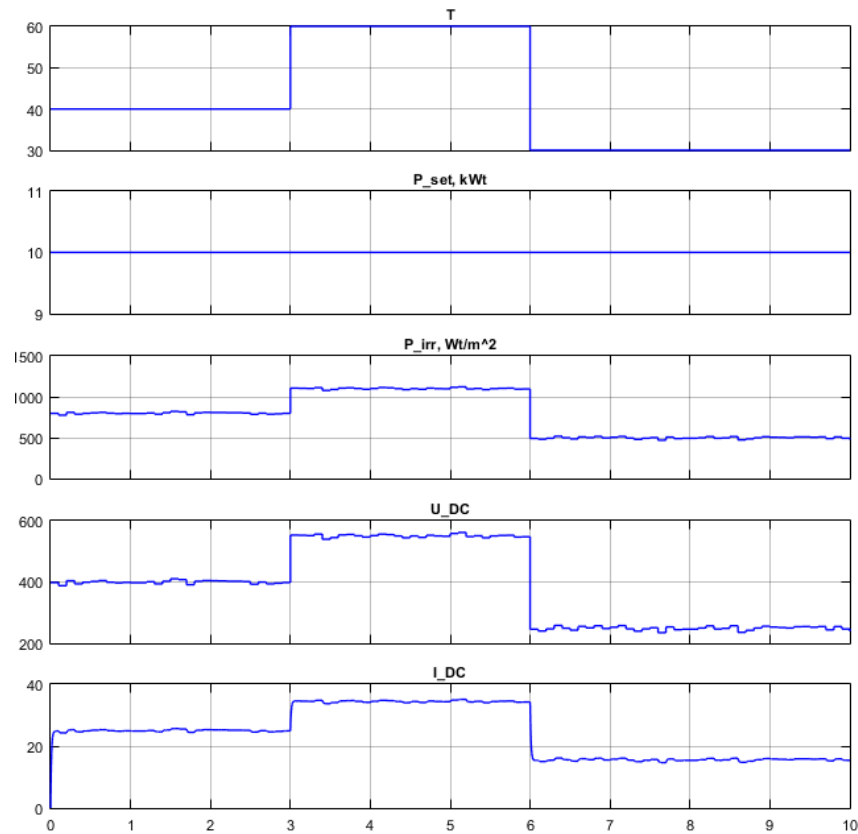


Рис. 4. Заданное и фактическое значения уровня освещенности, выходной ток и напряжение солнечной батареи

Компьютерная модель, соответствующая схемотехнической элементной базе многоуровневого инвертора напряжения и работающая в соответствии с законом (4), приведена на рис. 5. В ее состав входят функциональные блоки: солнечный модуль (solar module), трехуровневой инвертор напряжения (three-level voltage inverter), трансформатор (transformer), фильтр (L-filter), нагрузка (load), сеть (grid), система коммутации (commutation system), регулятор продольной составляющей тока инвертора I_d (controller I_d), регулятор поперечной составляющей тока инвертора I_q (controller I_q).

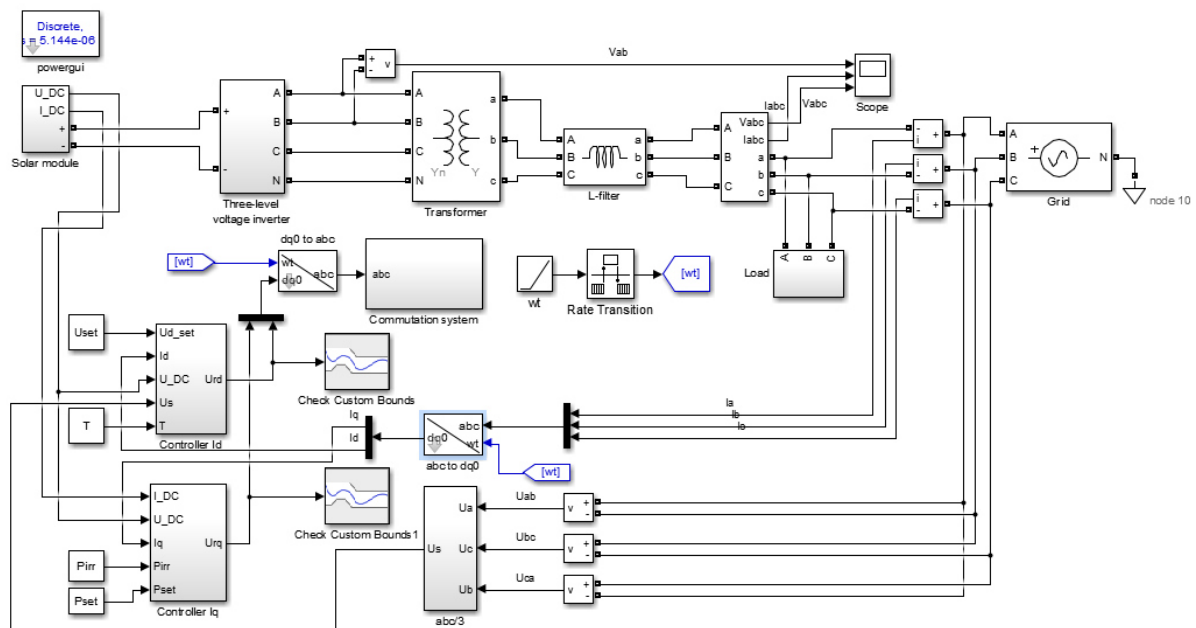


Рис. 5. Компьютерная модель, соответствующая схемотехнической элементной базе многоуровневого инвертора напряжения

Проведя моделирование системы управления многоуровневым сетевым инвертором напряжения при работе с солнечным модулем и сетью, получили графики переходных процессов температуры солнечных модулей, выходного напряжения сетевого многоуровневого инвертора напряжения, графики переходных процессов тока и напряжения на выходе трансформатора, активной и реактивной мощностей для различных режимов работы: при различных уровнях освещенности (рис. 6), при различных настройках регуляторов (рис. 7), без учета (и с учетом) L-фильтра в системе (рис. 8).

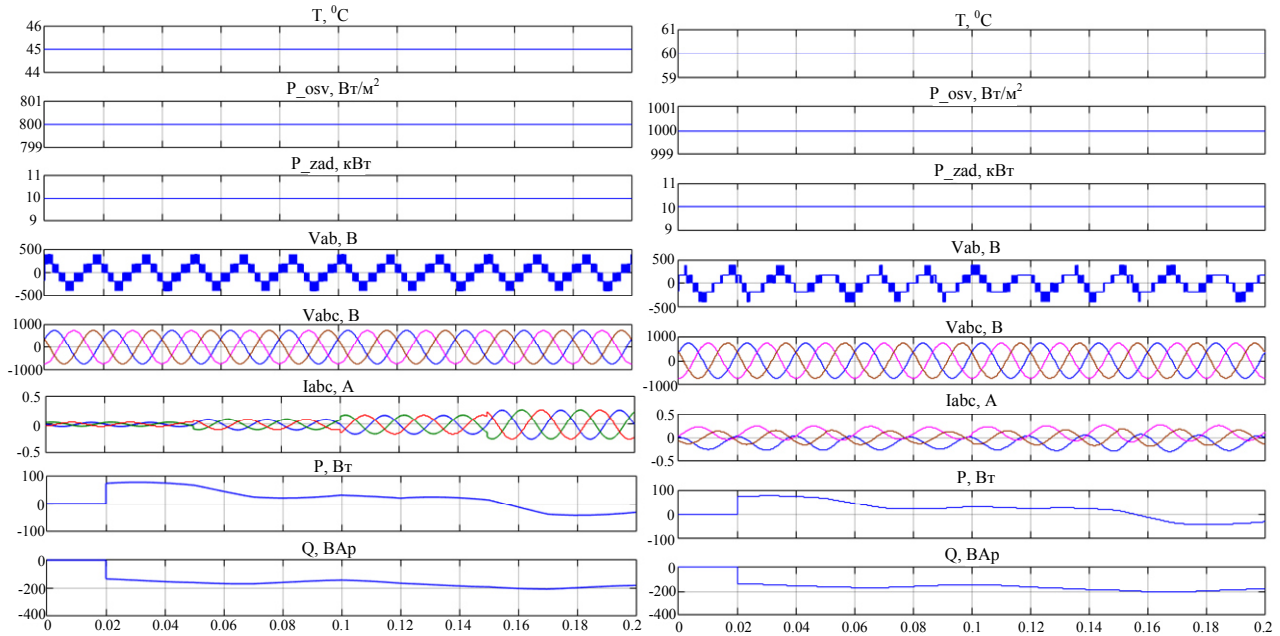


Рис. 6. Графики переходных процессов системы управления многоуровневым сетевым инвертором напряжения при различных уровнях освещенности

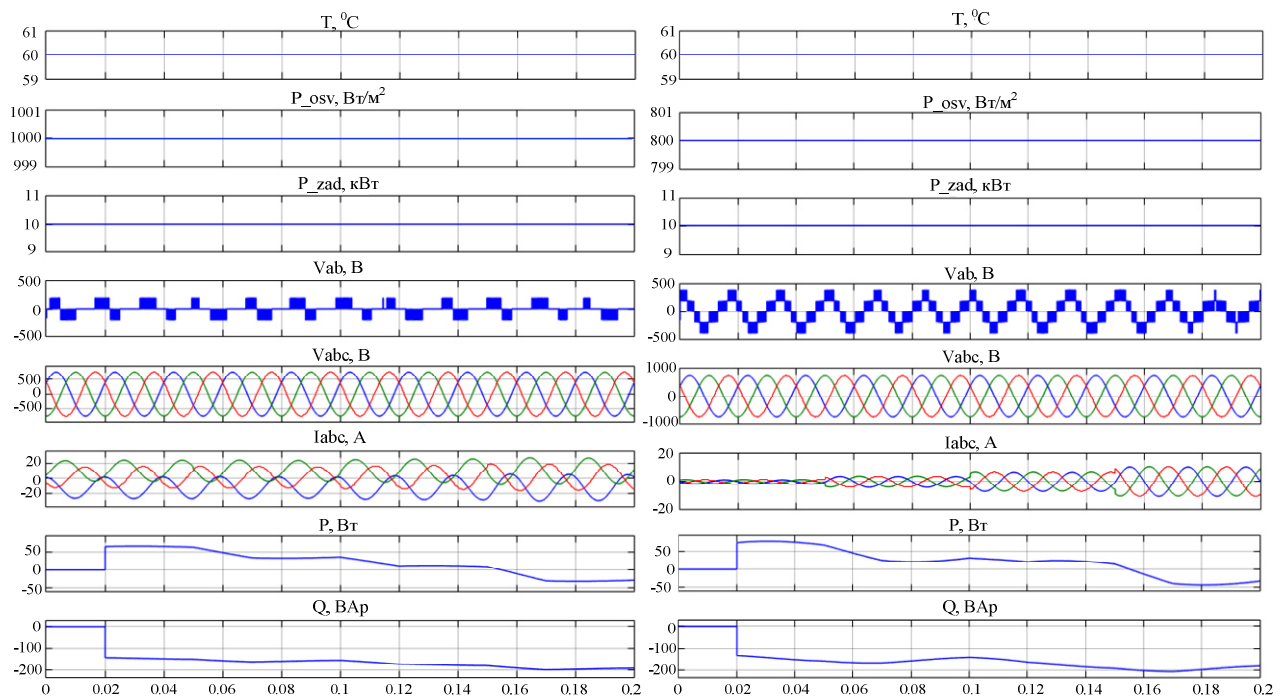


Рис. 7. Графики переходных процессов системы управления многоуровневым сетевым инвертором напряжения при различных настройках регуляторов

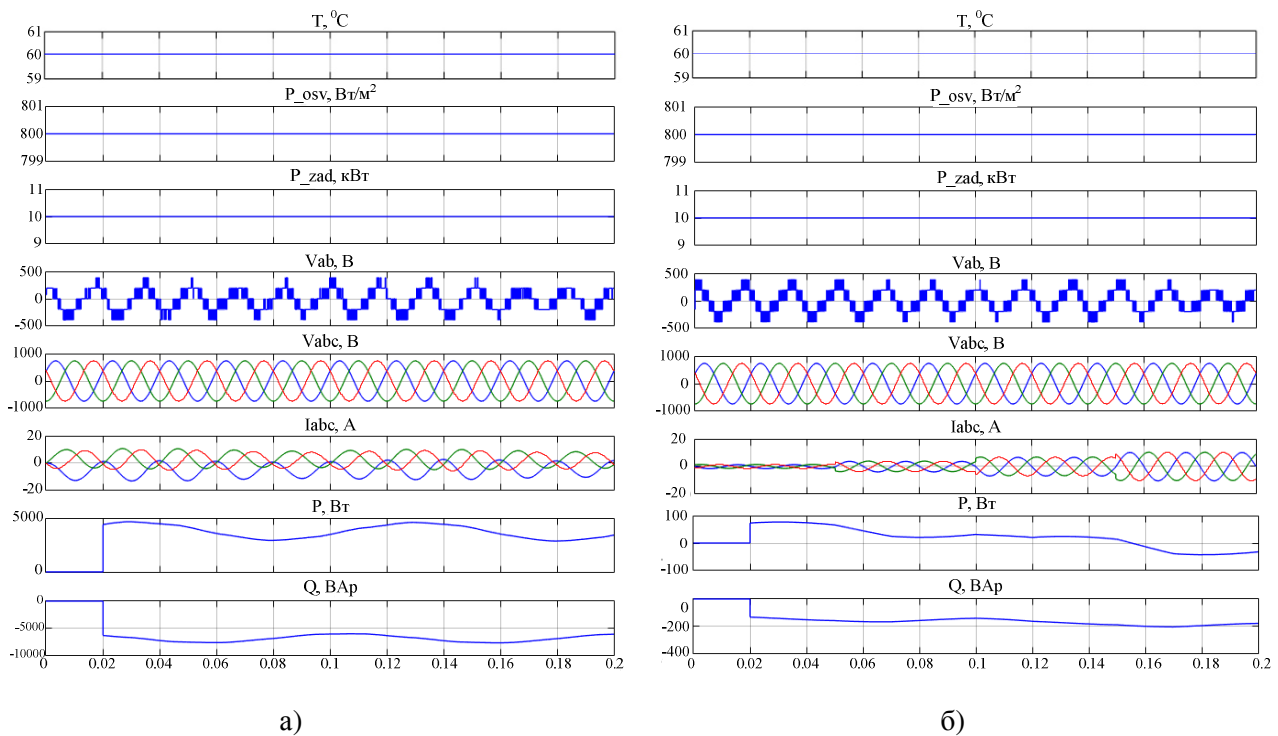


Рис. 8. Графики переходных процессов системы управления многоуровневым сетевым инвертором напряжения с некомпенсированным фильтром (а) и фильтром с автоматической компенсацией (б)

При проведении моделирования были определены оптимальные настройки регуляторов системы, полученные с помощью инструмента оптимизации Check Custom Bounds (рис. 5). В процессе поиска оптимальных значений параметров настройки использовали каналы обратной связи системы (P , U , f), значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные настройки регуляторов системы

Весовой коэффициент	k_{g_DC}	k_{g_s}	k_{g_i}	k_p	k_u	k_{g_irr}	k_{sl}	k_t
Значение	2	1	0.03	2	0.01	0.1	0.1	0.2

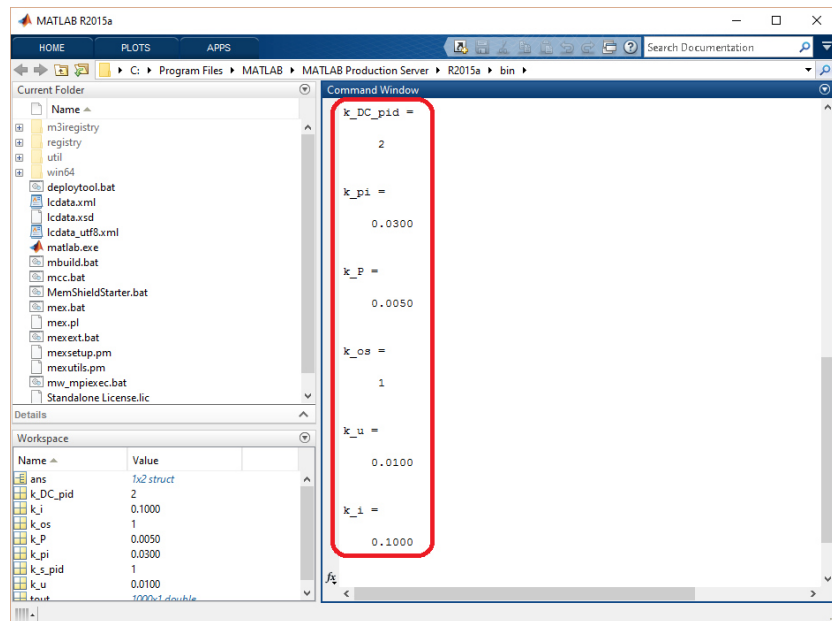


Рис. 9. Оптимальные настройки регуляторов

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод, что система управления многоуровневым сетевым инвертором солнечного модуля будет некорректно работать при отсутствии L-фильтра на выходе инвертора, о чем свидетельствует появление несинусоидальности выходного тока. Также при неправильных настройках регуляторов выходное напряжение инвертора не будет соответствовать ожидаемому значению. Переходные процессы системы управления многоуровневым сетевым инвертором будут удовлетворительными при использовании фильтра с автоматической компенсацией и оптимальными настройками регуляторов, которые определены в работе.

Выводы

Разработана компьютерная модель системы управления многоуровневым сетевым инвертором солнечной электростанции, которая решает задачи удержания режима работы солнечного модуля в точке отбора максимальной мощности и учитывает значение температуры солнечного модуля, что позволяет увеличить производительность солнечного модуля, привести в соответствие баланс сгенерированной солнечным модулем и потребленной электрической мощности в режиме реального времени. Осуществлено компьютерное моделирование регулятора продольной составляющей тока инвертора, которая учитывает текущее и заданное напряжения сети и напряжение солнечного модуля. Осуществлено компьютерное моделирование регулятора поперечной составляющей тока инвертора, которая учитывает заданное значение активной мощности из узла сети и заданное значение поперечной составляющей тока, необходимой для работы инвертора в области точки отбора максимальной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey / J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz [and others] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2006. – Vol. 53., No. 4. – P. 1002 – 1016.
2. Blaabjerg F. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems / F. Blaabjerg, Z. Chen, S. B. Kjaer // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – Vol. 19, No. 5. – P. 1184 – 1194.
3. Teodorescu R. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodríguez [Электронный ресурс] // John Wiley & Sons, Ltd., 2011. Режим доступа: http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781136559877_sample_656689.pdf.
4. Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers (2nd edition)

- [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.farzadrazavi.com/files/Courses/microgrid/902/GRID%20CONVERTERS%20FOR%20PHOTOVOLTAIC%20AND%20WIND%20POWER%20SYSTEMS.pdf>.
5. Fei W. Grid-interfacing converter systems with enhanced voltage quality for microgrid application-concept and implementation / W. Fei, J. L. Duarte, M. A. M. Hendrix // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2011. – Vol. 26, No. 12. – P. 3501 – 3513.
 6. Sezen Serkan. A Three-Phase Three-Level NPC Inverter Based Grid-Connected Photovoltaic System With Active Power Filtering. IEEE 2014 / Serkan Sezen, Ahmet Aktas, Mehmet Ucar, Engin Ozdemir // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 21 – 24 Sept. 2014. – Antalya: IEEE, 2014. – P. 1572 – 1576.
 7. Волков А. В. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения // А. В. Волков, Ю. С. Скалько // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 4/2008 (51), Частина 1. – С. 14 – 17.
 8. Жемеров Г. Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, И. Г. Титаренко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2013. – № 2. – С. 40 – 47.
 9. Gupta Aarti. Grid integrated solar photovoltaic system using multi level inverter / Aarti Gupta, Preeti Garg // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – August 2013. – Vol. 2, Issue 8. – P. 3952 – 3960.
 10. Simeen. S. Mujawar. Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance [Електронний ресурс] / Simeen. S. Mujawar, G. M. Karve // Novateur publications international journal of innovations in engineering research and technology [IJERT]. – ISSUE 2 DEC – 2014. – Volume 1. – Режим доступу: <http://oaji.net/articles/2014/1511-1419841971.pdf>.
 11. Левицький С. М. Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції / С. М. Левицький // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №5 (2015). – С. 26 – 29.
 12. Лежнюк П. Д. Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 45 – 47.
 13. Левицький С. М. Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги / С. М. Левицький, В. С. Бомбик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – Випуск 1/2016 (33). – С. 75.

Бомбик Вадим Сергеевич – аспірант кафедри електромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: bombikvs@gmail.com.
Винницкий национальный технический университет.