УДК 621.314(076) DOI: https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4(116).81-85

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ С ГИСТЕРЕЗИСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

И.Н.Жукова*, А.Д.Иванов*,, А.В.Байбузов****

SIMULATION OF A HYSTERESIS CONTROLLED POWER SUPPLY

I.N.Zhukova*, A.D.Ivanov*,, A.V.Baybuzov****

**Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Irina.Zhukova@novsu.ru*
***АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, antonio15@mail.ru*

Предложена схема источника вторичного электропитания с гистерезисным управлением. Дано описание ее работы. Представлена модель источника на симуляторе LTspice. Приведены результаты компьютерного моделирования его работы: временные диаграммы токов и напряжений на отдельных элементах схемы. Выполнен анализ характеристик выходного сигнала в зависимости от параметров элементов источника. Получены оценки величины пульсаций выходного напряжения источника для разных значений размаха гистерезиса, параметров индуктивности и емкости. Даны рекомендации по выбору элементной базы источника

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, гистерезисное управление, моделирование

The paper proposes a circuitry of secondary power supply with hysteresis control. A description of its work is given. The source model on LTspice simulator is described. The results of a power supply computer simulation are shown: time diagrams of currents and voltages on individual elements of the circuit. The analysis of the characteristics of the output signal is carried out depending on the parameters of the power supply components. Estimates of the output voltage pulsations of the source for different values of the hysteresis span, inductance and capacitance parameters are obtained. Recommendations on the choice of the element base of the source are given.

Keywords: secondary power supply, hysteresis control, simulation

Введение

Современные источники вторичного электропитания различаются многообразием схемотехнических решений, топологий и видов управления. Особое место в этом ряду занимает гистерезисное управление вторичным источником электропитания.

Принципы гистерезисного управления разработаны еще в 90-х гг. прошлого столетия. Его свойства изложены в публикациях Davoodnezhad R.A., Shukla A., Gupta R. [1-3]. Гистерезисное управление реализуется на двухпороговом компараторе, расположенном в цепи обратной связи источника. Данный тип управления отличается повышенной устойчивостью работы обратной связи, не требующей введения коррекции. В отличие от других типов управления, в частности управления по напряжению и току, источник с гистерезисным управлением имеет наилучший отклик при изменении нагрузки. Это достигается за счет минимальной задержки в цепи обратной связи.

К недостаткам гистерезисного управления можно отнести повышение выходной пульсации источника. Допустимая величина пульсаций обеспечивается тщательным выбором элементной базы при проектировании вторичного источника. Сложность достижения требуемых параметров вторичного источника с гистерезисным управлением сдерживает их широкое распространение.

При разработке источника вторичного питания важно, чтобы проектируемое устройство удовлетворяло требованиям заказчика, имело наилучшие параметры и работало без отказов. При производстве разброс параметров выпускаемых изделий должен оставаться в допустимых пределах. Источники питания должны сохранять устойчивую работу при различных условиях эксплуатации и внешних физических воздействиях. Выявить причины возможных сбоев в работе устройства, проанализировать процесс протекания аварийной ситуации, приводящей к выходу из строя вторичного источника, помогает компьютерное моделирование. Важно, чтобы модель источника точно имитировала работу реального устройства.

При проектировании источников моделирование помогает подобрать элементную базу, позволяет проанализировать временные диаграммы напряжений и токов на каждом элементе исследуемой схемы, дает возможность исследовать режимы работы и выявить критические условия функционирования источника, облегчает его настройку.

В настоящее время разработчику доступно большое количество программ, позволяющих производить моделирование работы электронных схем. Программы реализуют математические модели отдельных элементов, обеспечивая быстроту и точность расчетов при моделировании исследуемого устройства. Наибольшей популярностью пользуются программы, использующие SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) алгоритм моделирования процессов, протекающих в электронных схемах. К таким системам относятся: HSPICE (фирма «MetaSoftware»); PSpice («Microsim»); MicroCap V («Spectrum Software»); Circuit Maker («The Virtual Elektronics Lab»); Dr. Spice; ViewSpice («Deutsch Research») и др. Остановим свой выбор на симуляторе LTspice от корпорации Linear Technology, который позволяет моделировать аналогово-цифровые схемы, имеет дружественный интерфейс и обеспечивает высокую скорость моделирования [4,5].

В статье предложена модель источника вторичного электропитания с гистерезисным управлением, дано описание ее работы, представлены временные диаграммы токов и напряжений на отдельных элементах схемы, приведены результаты исследований изменения выходного напряжения в зависимости параметров элементов схемы источника.

Модель схемы источника вторичного электропитания в симуляторе LTspice

Модель источника вторичного электропитания в симуляторе LTspice представлена на рис.1.

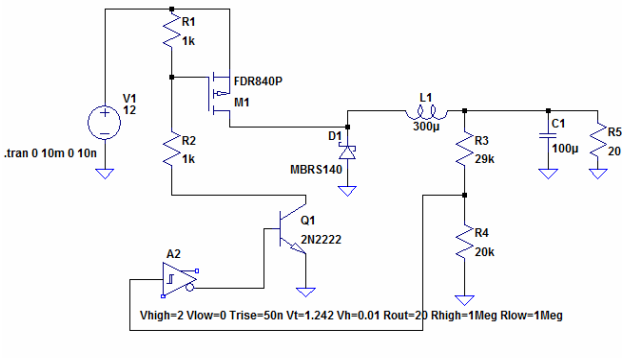


Рис.1. Схема источника вторичного электропитания с гистерезисным управлением

Источник вторичного электропитания имеет понижающую топологию. Напряжение на входе равно 12 В. Уровень выходного напряжения устанавливается делителем напряжения на R3 и R4 в цепи обратной связи, а также пороговым напряжением V_t срабатывания компаратора A2 согласно выражению:

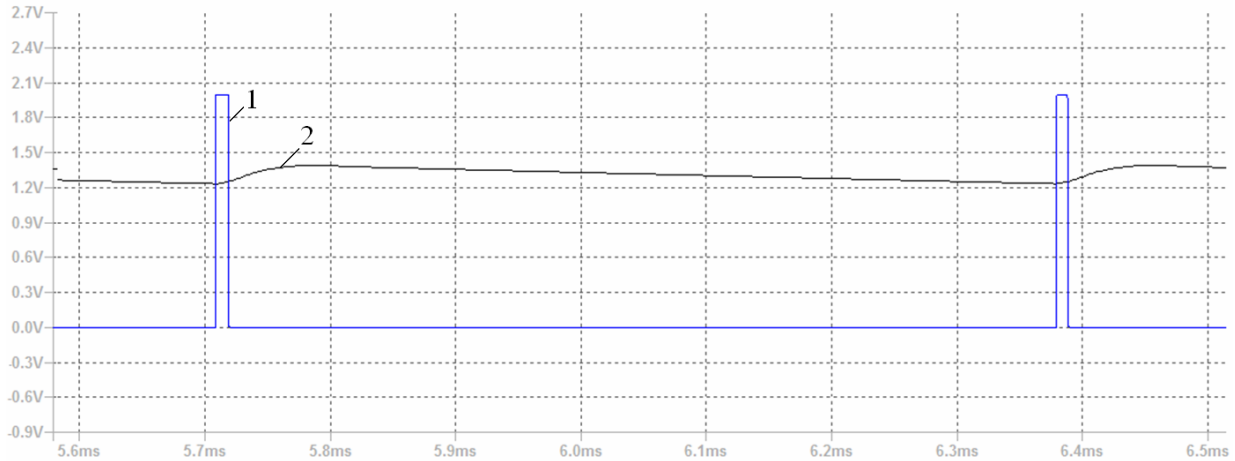
$$U_{\text{вых}} = V_t \cdot \frac{\text{R3}+\text{R4}}{\text{R4}}. \qquad (1)$$

Требуемое напряжение на выходе источника, например, $U_{\text{вых}}$ =3 В обеспечивается при V_t = 1,242 В резисторами R3 = 29 кОм и R4 = 20 кОм.

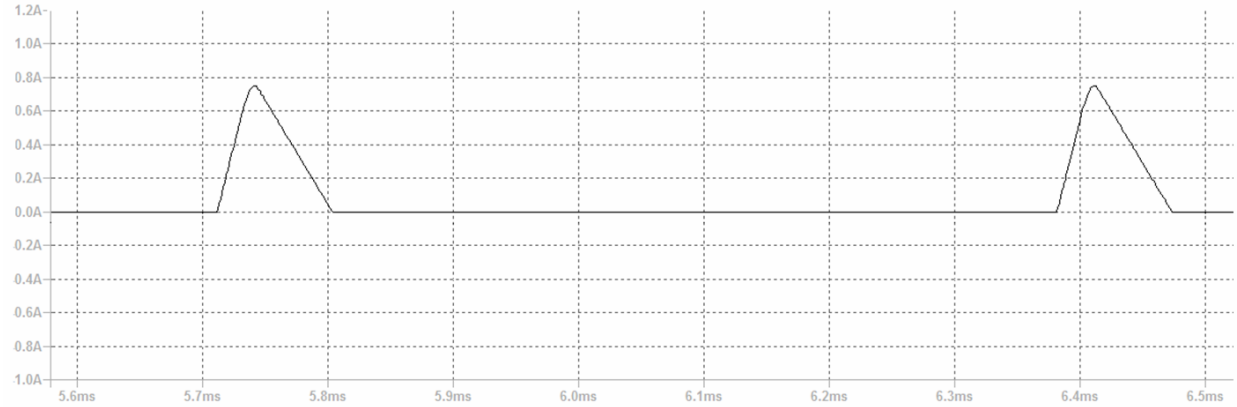
Принцип работы данной схемы представлен осциллограммами на рис.2 и состоит в следующем.

Выходное напряжение через делитель R3 – R4 подается на вход компаратора, при срабатывании которого замыкается цепь обратной связи источника. Переключение выхода компаратора A2 из низкого состояния в высокое и обратно происходит по двум разных по значению порогам срабатывания: V_t и (V_t + V_h) соответственно, где V_h — напряжение гистерезиса.

В установившемся режиме при достижении порога срабатывания V_t на выходе компаратора A2 появляется высокий уровень напряжения, который открывает транзистор M1, что приводит к нарастанию тока в катушке L1, а следовательно, и напряжения на выходе



а)



б)

Рис.2. Временные диаграммы работы источника вторичного электропитания в установившемся режиме работы. а) 1 — сигнал на выходе компаратора A2; 2 — сигнал на входе компаратора A2; б) ток в катушке индуктивности L1

источника. Как только выходное напряжение, поданное через делитель R3 – R4 на вход компаратора A2, достигает порога срабатывания (V_t + V_h), транзистор M1 закрывается, и ток в катушке L1 начинает снижаться, заряжая конденсатор C1.

Полный заряд конденсатора C1 соответствует моменту, когда ток в катушке уменьшается до нуля. В этот момент выходное напряжение достигает максимального значения. После этого конденсатор начинает постепенно разряжаться, выходное напряжение снижается до момента повторного срабатывания компаратора A2.

В результате цикличности процесса срабатываний компаратора A2 в выходном напряжении источника возникают неустранимые пульсации, что является существенным недостатком данного типа управления. Кроме того, выражение (1) устанавливает нижний уровень выходного напряжения. Это следует из анализа сигнала на входе компаратора A2 (диаграмма 2 на рис.2а), в (R3+R4)/R4т = 2,45 раз меньшего выходного сигнала и изменяемого в диапазоне от V_t до $V_t + \Delta U \cdot R4/(R3 + R4)$, где ΔU — диапазон пульсаций выходного напряжения источника.

Результаты исследований пульсаций выходного напряжения источника

Величину пульсаций выходного напряжения источника вторичного питания с гистерезисным управлением определяют три элемента: компаратор A2, катушка индуктивности L1 и конденсатор C1. Исследуем зависимость величины пульсаций от параметров этих элементов.

Основным параметром компаратора, влияющим на величину пульсаций выходного напряжения, является размах гистерезиса V_h. Его величина определяет длительность выходных импульсов компаратора A2 и, как следствие, величину максимального выброса тока индуктивности L1 и напряжения на емкости C1. Моделирование показало, что при V_h = 50 мВ наблюдались пульсации выходного напряжения источника размахом ΔU =1 В, при V_h = 20 мВ размах пульсаций становится равным ΔU =0,5В, а при V_h = 10 мВ снижается до ΔU = 0,3В. При этом индуктивность L1 и емкость C1 оставались неизменными. Таким образом, при уменьшении V_h происходит снижение пульсаций на выходе источника питания. Однако размах гистерезиса не рекомендуется делать меньше 10 мВ, поскольку из-за амплитудных шумов компаратора снижается точность регулирования выходного напряжения проектируемого источника. Поэтому выбор размаха гистерезиса — вопрос компромисса.

Бороться с пульсациями можно другими способами, меняя, например, индуктивность катушки L1 и/или емкость конденсатора C1.

Зависимость выходных пульсаций напряжения от значения индуктивности L1 при фиксированной емкости конденсатора представлена на рис.3, а на рис.4 отображена зависимость выходных пульсаций напряжения от ёмкости конденсатора C1 при неизменной индуктивности.

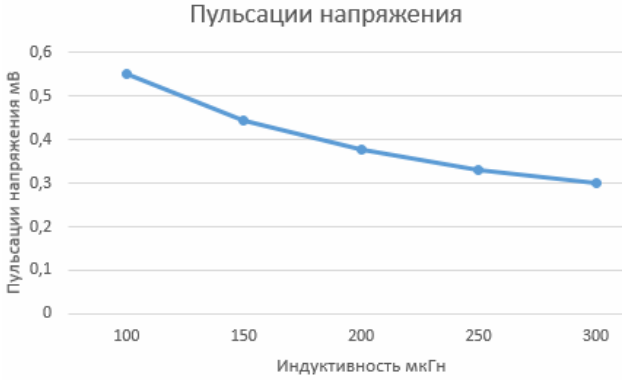


Рис.3. Зависимость ΔU (L1) при C1 = 100 мкФ

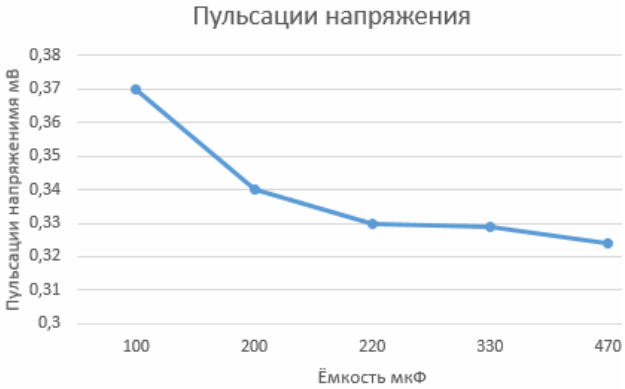


Рис.4. Зависимость ΔU (C1) при L1 = 300 мкГн

Анализ зависимостей позволяет сделать вывод о том, что пульсации напряжения можно уменьшить путем увеличения индуктивности и/или емкости. При этом растет постоянная времени цепи L1 — C1. Ток в индуктивности L1 и напряжение на емкости C1 изменяются медленнее, что и приводит к снижению пульсаций. Следствием этого является снижение частоты следования импульсов компаратора A2.

Анализ работы источника при включении

При включении источника питания выходное напряжение резко растет, значительно превышая требуемое значение, а затем постепенно снижается до номинального значения. Это связано с тем, что компаратор A2 имеет инверсный выход, который при включении источника находится на высоком логическом уровне. Длительность первого импульса компаратора определяется интервалом нарастания выходного сигнала до напряжения ($V_t + V_h$)((R3 + R4)/R4), при котором на инверсном выходе компаратора появится низкий уровень. Вследствие этого транзистор открыт длительный срок, ток в катушке индуктивности растет. Заряд конденсатора также имеет высокое напряжение. Снижение напряжения до установившегося режима занимает длительное время, пока в цепи обратной связи не установится напряжение, равное порогу включения компаратора A2. После этого источник питания переходит в установившийся режим работы.

На рис.5 представлено выходное напряжение источника питания (диаграмма 1), напряжение обратной связи (диаграмма 2) и сигнал на выходе компара-

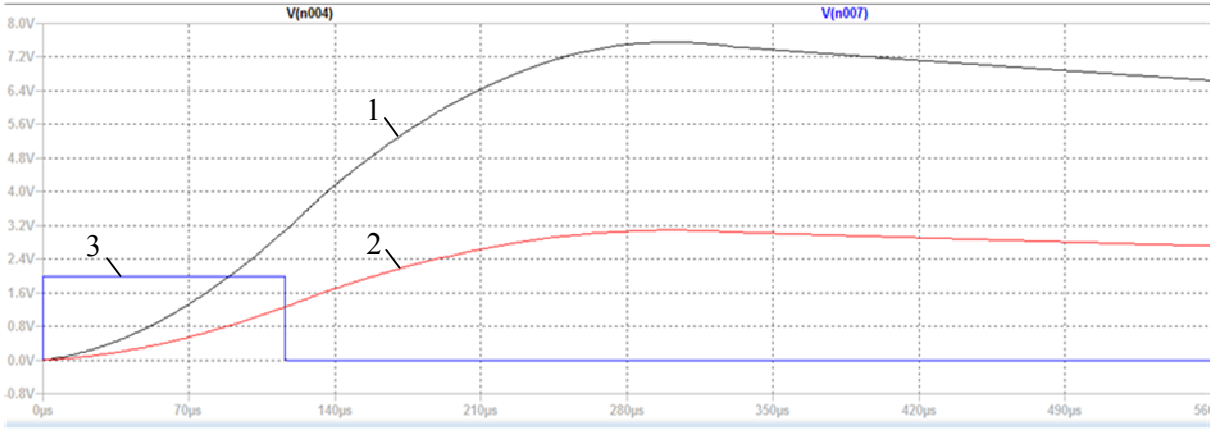


Рис.5. Выходное напряжение источника питания, напряжение обратной связи и работа компаратора

тора A2 (диаграмма 3). Можно наблюдать, что при включении источника максимальное значение выходного напряжения равно 7,6 В, что составляет приблизительно 2/3 от напряжения питания.

Импульсные скачки напряжения и тока при включении оказывают негативное влияние на работу нагрузки. Для сглаживания возможных выбросов рекомендуется использовать «плавный пуск» источника питания.

Анализ работы источника на нагрузку

Нагрузка также оказывает влияние на работу источника питания. На рис.6 и 7 представлено изменение выходного напряжения источника вторичного электропитания при нагрузке 20 и 50 Ом соответственно.

При увеличении нагрузки возрастает постоянная времени, что влечет за собой увеличение длительности переходного процесса при включении источника, снижения напряжения до выходного. При нагрузке 20 Ом длительность переходного процесса составляет 2 мс, а при нагрузке 50 Ом она увеличивается до 5 мс.

Рекомендации по выбору элементной базы

Для увеличения быстродействия источника требуется использовать особые компоненты. В качестве транзистора рекомендуется применять мощный, быстродействующий p-канальный полевой транзистор с изолированным затвором MOSFET (МОП-транзистор). Обратный диод D1, используемый в качестве выпрямителя, должен принадлежать семейству ультрабыстрых диодов.

Катушка L1 выбирается исходя из требований и ограничений на допустимую величину. Для минимизации пульсаций выходного напряжения индуктивность должна быть как можно больше. Однако

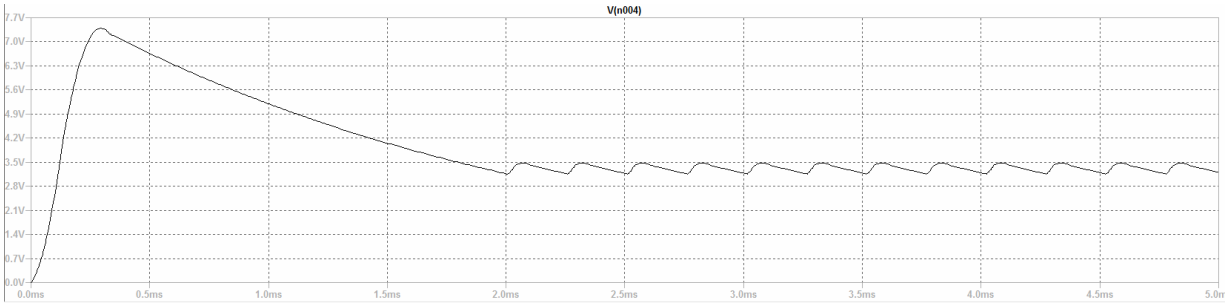


Рис.6. Изменение выходного напряжения источника вторичного электропитания при нагрузке 20 Ом

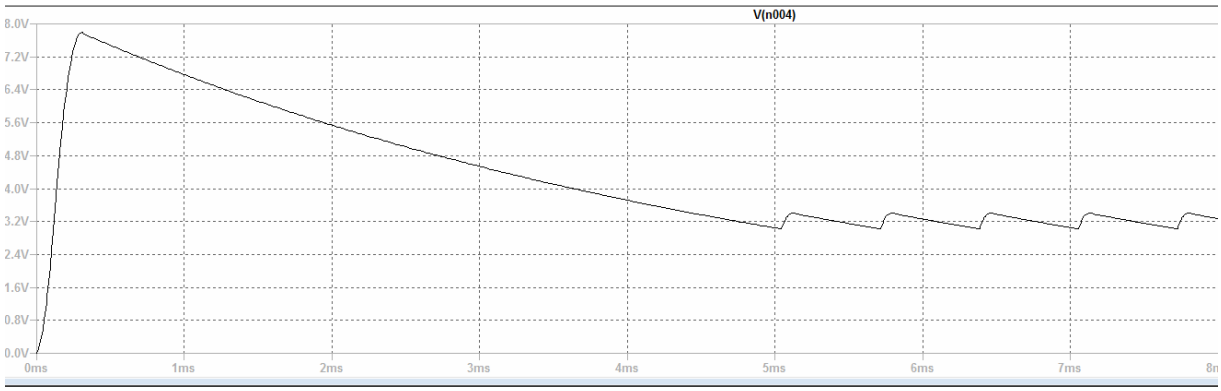


Рис.7. Изменение выходного напряжения источника вторичного электропитания при нагрузке 50 Ом

при значительном увеличении L1 происходит рост габаритов катушки. Кроме того, катушка индуктивности выбирается исходя из значения выходного тока источника. При L1 = 300 мкГн выходной ток равен 0,15 А. Ток в 1 А на выходе источника может быть получен при индуктивности 20 мкГн.

Выбор конденсатора C1 определяется величиной его эквивалентного последовательного сопротивления (ESR). Конденсатор с меньшей величиной ESR предпочтительнее, поскольку меньше рассеивает мощности и меньше нагревается, сохраняя неизменной емкость, а следовательно, и параметры источника.

При технической реализации источника целесообразно рассмотреть возможность применения контроллера LM3485 [6], поддерживающего гистерезисное управление.

Заключение

Моделирование источника вторичного электропитания позволило лучше понять принципы его гистерезисного управлением. Анализ временных диаграмм напряжений и токов на элементах источника позволил выявить зависимости величины пульсаций выходного напряжения от параметров элементов источника, определить особенности поведения преобразователя при возникновении различных переходных процессов, дать рекомендации по подбору элементной базы.

1. Davoodnezhad R., Holmes D.G., McGrath B.P. A Novel Three-Level Hysteresis Current Regulation Strategy for Three Phase Three-Level Inverters // IEEE Trans. on Power Electron. 2013. Vol.29. №11. P.6100-6109.
2. Shukla A., Ghosh A., Joshi A. Hysteresis Modultion of Multilevel Inverters // IEEE Trans. on Power Electron. 2011. Vol.26. №5. P.1396-1409.
3. Gupta R., Ghosh A., Joshi A. Multiband Hysteresis Modulation and Switching Characterization for Sliding-Mode-Controlled Cascaded Multilevel Inverter // IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. Vol.57. №7. P.2344-2353.
4. Володин В. Краткое руководство по симулятору LTspice [Эл. ресурс]. URL: http://valvolodin.narod.ru/articles/LTspice.pdf (дата обращения 05.05.2019).
5. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice. Учебно-методическое пособие. Псков: Издательство ППИ, 2008. 165 с.
6. Контроллер PFET LM3485 компании National Semiconductor [Электронный ресурс]. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/powersuply/lm3485.htm (дата обращения 10.05.2019).

References

1. Davoodnezhad R., Holmes D.G., McGrath B.P. A Novel Three-Level Hysteresis Current Regulation Strategy for Three Phase Three-Level Inverters. IEEE Trans. on Power Electron, 2013, vol.29, no.11, pp.6100-6109.
2. Shukla A., Ghosh A., Joshi A. Hysteresis Modultion of Multilevel Inverters. IEEE Trans. on Power Electron, 2011, vol.26, no.5, pp. 1396-1409.
3. Gupta R., Ghosh A., Joshi A. Multiband Hysteresis Modulation and Switching Characterization for Sliding-Mode-Controlled Cascaded Multilevel Inverter. IEEE Trans. Ind. Electron, 2010, vol.57, no.7, pp.2344-2353
4. Volodin V. Kratkoye rukovodstvo po simulyatoru LTspice [LTspice Simulator quick start guide]. Available at: http://valvolodin.narod.ru/articles/LTspice.pdf (assessed 05.05.2019).
5. Sokhor Yu.N. Modelirovaniye ustroystv v LTSpice. Uchebno-metodicheskoye posobiye. [Device simulation in LTSpice. Educational and methodical manual]. Pskov, PPI Publ., 2008, 165 p.
6. The PFET LM3485 controller of the National Semiconductor company. Available at: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/powersuply/lm3485.htm (accessed 10.05.2019)