

УДК 621.3.072.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-75-82

Моделирование самообучающейся системы управления инвертором преобразователя частоты для подавления высших гармоник

В.И. Кульманов, А.С. Анучин, Д.М. Шпак, Ю.О. Беляков, В.Н. Остриров

Рассмотрено моделирование трехфазного преобразователя частоты на базе трех однофазных мостовых инверторов напряжения с выходным синусным фильтром. Для управления инверторами преобразователя предложена новая самообучающаяся система управления. Разработанная ранее система управления инверторами для подавления высших гармоник использует дискретное преобразование Фурье (ДПФ) выходного напряжения. Регулирование каждой гармоники (основной и высших) осуществляется отдельным регулятором. Результатом ДПФ являются амплитуды основной и ряда высших гармоник, поступающие на регуляторы в качестве обратных связей. Главный недостаток существующей системы заключается в ее высоких требованиях к вычислительным мощностям микроконтроллера.

Новая система основана на принципе самообучения, в качестве регулятора выходного напряжения здесь используется периодический интегратор (P -интегратор). В дискретном виде он представлен массивом дискретных интеграторов, причем каждый из них работает только на $1/64$ части периода основной гармоники. Программный код новой системы значительно меньше по объему и содержит меньше «долгих» арифметических операций, благодаря чему она проста в реализации и требует меньше вычислительных ресурсов. Подавление высших гармоник показывает хорошие результаты: коэффициент гармонических искажений выходного напряжения не превышает 5 % при линейной и нелинейной нагрузках.

Описаны структура модернизированной системы управления и ее реализация в программном пакете MATLAB Simulink. Представлены преимущества самообучающегося алгоритма по сравнению с алгоритмом на базе дискретного преобразования Фурье. Результаты моделирования подтверждают применимость нового метода. Алгоритм реализован на языке Си в блоке S -функции MATLAB и подходит для реализации в системах управления реального времени на базе специализированных микроконтроллеров без существенных доработок программного кода.

Ключевые слова: гармонические искажения, преобразователи частоты, самообучающиеся системы управления, силовые фильтры.

Для цитирования: Кульманов В.И., Анучин А.С., Шпак Д.М., Беляков Ю.О., Остриров В.Н. Моделирование самообучающейся системы управления инвертором преобразователя частоты для подавления высших гармоник // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 75—82. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-75-82.

Simulating the Frequency Converter Inverter's Self-Learning Control System for Suppressing Higher Harmonic Components

V.I. Kul'manov, A.S. Anuchin, D.M. Shpak, Yu.O. Belyakov, V.N. Ostrirov

Simulation of a three-phase frequency converter based on three single-phase full-bridge voltage inverters with a sine-wave output filter is considered. A new self-learning control system for the converter's inverters is proposed. The previously developed inverter control system uses the discrete Fourier transform (DFT) to suppress the output voltage higher harmonic components. Individual regulators are used to control each harmonic component (including the fundamental and higher-order ones). The DFT algorithm produces signals proportional to the amplitudes of the fundamental and a number of higher-order harmonic components, which are applied to the regulators as feedbacks. The main drawback of the existing system is that it poses rather high demand to the microcontroller computation capacities.

The newly proposed system is based on the self-learning principle and uses a periodic integrator (a P -integrator) as the output voltage regulator. The P -integrator is represented in discrete form by an array of discrete integrators, each of which operates only in the $1/64$ part of the fundamental harmonic component cycle. The new control system's software code is much smaller in size and contains a fewer number of "slow" arithmetic operations, due to which it is easier to implement and less demanding with respect to computation resources. The control system analysis results demonstrate its good performance in terms of suppressing higher harmonic components: the output voltage total harmonic distortion factor does not exceed 5% for the cases of operation on linear and nonlinear loads.

The article describes the modernized control system structure and its implementation in MATLAB Simulink software package. Advantages of the self-learning algorithm as compared with the algorithm based on the discrete Fourier transform are demonstrated. The simulation results confirm the applicability of the new control method. The algorithm is implemented in the C language in the MATLAB S -function block and is suitable for being implemented in real-time control systems based on dedicated microcontrollers without the need of significantly modifying the software code.

Key words: harmonic distortion, frequency converters, self-learning control systems, power filters.

For citation: Kul'manov V.I., Anuchin A.S., Shpak D.M., Belyakov Yu.O., Ostrirov V.N. Simulating the Frequency Converter Inverter's Self-Learning Control System for Suppressing Higher Harmonic Components. MPEI Vestnik. 2017; 4: 75—82. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-75-82.

Введение

Высокий уровень развития современной силовой электроники и микроконтроллеров позволяет разрабатывать новые устройства преобразования и распределения электроэнергии с недоступными ранее показателями качества и внедрять их в областях, считавшихся до сегодняшнего дня нехарактерными для полупроводниковой преобразовательной техники. Одна из таких областей — авиационные системы генерирования электроэнергии переменного тока.

Системы генерирования большинства современных самолетов (Airbus A310, A330, A340, Boeing 747-100, Ил-96-300, Ту-204) включают в себя синхронный генератор, приводимый через привод постоянной частоты вращения (ППЧВ), который решает задачу стабилизации частоты вращения генератора, и, следовательно, частоты напряжения в сети. Привод имеет ряд принципиальных недостатков (малый ресурс, высокую стоимость и расходы на обслуживание, невысокую надежность), что делает системы ПСПЧ (переменная скорость – постоянная частота) одним из наиболее перспективных направлений развития авиационных систем электроснабжения. Кроме того, повышение качества электроэнергии, достижимое в системах ПСПЧ, позволяет в перспективе улучшить массогабаритные и энергетические показатели бортовых потребителей [1].

Необходимость коррекции гармонического состава показана в работе, посвященной моделированию преобразователя частоты для систем ПСПЧ [2]. Описанная система управления использует дискретное преобразование Фурье для коррекции гармонических искажений. В течение периода выходного напряжения проводятся измерения, по результатам которых в конце периода рассчитываются амплитуды основной и наиболее выраженных высших гармоник (синусоидальные и косинусоидальные составляющие нечетных гармоник с третьей по девятую). Вычисленные амплитуды поступают в качестве обратных связей на интегральные регуляторы. Заданием регулятора основной гармоники является номинальное амплитудное напряжение, а для высших — нулевое. Сумма опорных кривых гармоник, домноженных на выходы соответствующих регуляторов, формирует задание для инвертора, т. е. вектор регуляторов раздельно регулирует каждую гармонику для подавления высших и поддержания номинального значения основной.

Система управления, предложенная в [2], была программно реализована на базе специального контроллера. Для отладки программного обеспечения и испытаний был изготовлен опытный образец преобразователя частоты (рис. 1) и собран стенд с питанием от промышленной сети через автотрансформатор.

Первоначальная наладка системы управления на холстом ходу показала, что без коррекции гармонического состава, даже в отсутствие нелинейной нагрузки, форма выходного напряжения оказывается сильно искажена в



Рис. 1. Опытный образец преобразователя частоты

результате влияния «мертвого времени». Коэффициент гармонических искажений в данных условиях превысил допустимый предел в 5 % и составил 5,5 %. После включения компенсации третьей, пятой и седьмой гармоник удалось снизить его значение до 2,4 %.

По окончании отладки программного обеспечения проводились нагрузочные испытания для оценки достигнутых показателей качества выходного напряжения. Опыт ставился с двумя видами нагрузки: линейной (активной) и нелинейной — двухполупериодной выпрямительной. В обоих случаях наибольший вклад в искажение напряжения вносит 11-я гармоника, первая из некомпенсированных. При линейной нагрузке коэффициент гармонических искажений не превышает 1 %, при выпрямительной его значение составляет порядка 2 %.

Реализация и проверка системы управления и испытания на «железе» демонстрируют достижимость требований [3] с применением только программных средств подавления высших гармоник. Тем не менее, метод, использующий разложение фазного напряжения в ряд Фурье, имеет один существенный недостаток. Из-за большого количества арифметических операций для работы в реальном времени он требует высоких вычислительных мощностей микроконтроллера. На одном из мощнейших микроконтроллеров семейства Motor Control от Texas Instruments его удалось реализовать лишь после глубокой оптимизации программного кода вплоть до использования языка ассемблера.

Анализ работ в области самообучающихся систем помог предложить альтернативное решение, гораздо менее требовательное к ресурсам микроконтроллера [4—7].

Новый алгоритм управления

Идея метода самообучения схожа с ранее предложенной в [2]: задание напряжения для следующего цикла $k + 1$ корректируется по данным измерений на предыдущем цикле k . Отличие состоит в способах анализа и использования собранных на предыдущем цикле данных. В новой системе управления данные измерений непосред-

ственно сравниваются с заданием для каждой «точки» (для каждого из $i = 64$ периодов ШИМ) на периоде выходного напряжения. Если на текущем периоде в i -й точке требуемое значение выходного напряжения оказалось больше, чем фактическое, то для следующего периода в этой точке нужно повысить задание для инвертора, и наоборот. Такой регулятор называется периодическим интегратором (P -интегратором) [3]. Кажется бы, вполне логичный и реализуемый алгоритм. Но есть одна проблема, не позволяющая реализовать данную систему. Она заключается в запаздывании между изменением задания на инверторе и откликом на это изменение в выходном напряжении. Получается, что приложенное к инвертору в i -й точке задание повлияет на выходное напряжение лишь на $(i + n)$ -й точке, где n зависит от периода ШИМ, времени обработки аналоговых сигналов и параметров синусного фильтра. Это приводит к расхождению процесса регулирования.

Проблема решается введением упреждающей коррекции [3]: чтобы изменить выходное напряжение в текущей i -й точке, на инвертор нужно подать задание из «будущей» $(i + n)$ -й точки, где n — упреждение, задаваемое в периодах ШИМ. Структура системы управления приведена на рис. 2.

Принцип работы системы управления достаточно прост. Заданием напряжения для инвертора на текущем k -м периоде в i -й точке служит выход интегратора под номером $i + n$. Если $i + n$ оказывается больше 64, то задание берется из начала следующего периода из точки $i + n - 64$. Выходное напряжение в i -й точке на текущем k -м периоде вычитается из задания в i -й точке и поступает на вход i -го интегратора, который служит заданием напряжения для инвертора уже на следующем $(k + 1)$ -м периоде основной гармоники, в точке $i - n$.

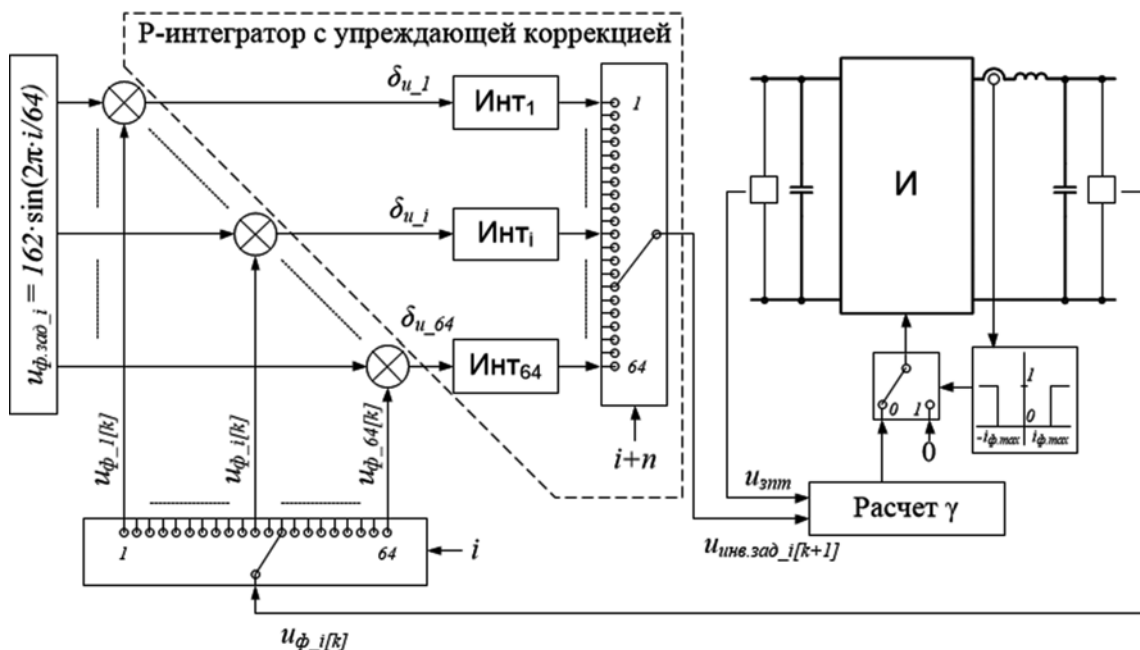


Рис. 2. Самообучающаяся система управления

Модель преобразователя и системы управления

Модель преобразователя состоит из трехфазных источника переменного напряжения и выпрямителя, звена постоянного тока, мостового инвертора и ШИМ-генератора (рис. 3). ШИМ-генератор с «мертвым временем» изображен на рис. 4. В модель синусного фильтра и нагрузки входит сам фильтр, датчики тока и напряжения, а также неуправляемый мостовой выпрямитель со своим LC -фильтром и активной нагрузкой (рис. 5).

Модель системы управления состоит из блока синусоидального задания выходного напряжения, измеренного напряжения и S -функции, реализующей массив интеграторов для расчета задания напряжения инвертора (рис. 6).

Ядро алгоритма управления, описанного в S -функции, представлено в листинге 1. Коэффициент регулятора $PIntKi$ и упреждение $PIntAdv$ настраиваются в маске блока S -функции.

```

CurrDelta = *RealInpPtr[0]; // deltaU = Uload_ref - Uload
CurrPoint++; //переходим к следующей точке
CurrPoint &= 63; //если i=64, то i=0
//рассчитываем точку для приложения задания
PrevPoint = CurrPoint - PIntAdv; //точка для
// управления с упреждением (PIntAdv = 2 Tрwm)
PrevPoint &= 63;
PInt[PrevPoint] = PInt[PrevPoint] + CurrDelta * PIntKi; //расчет P-
интегратора
    
```

Листинг 1. Ядро системы управления

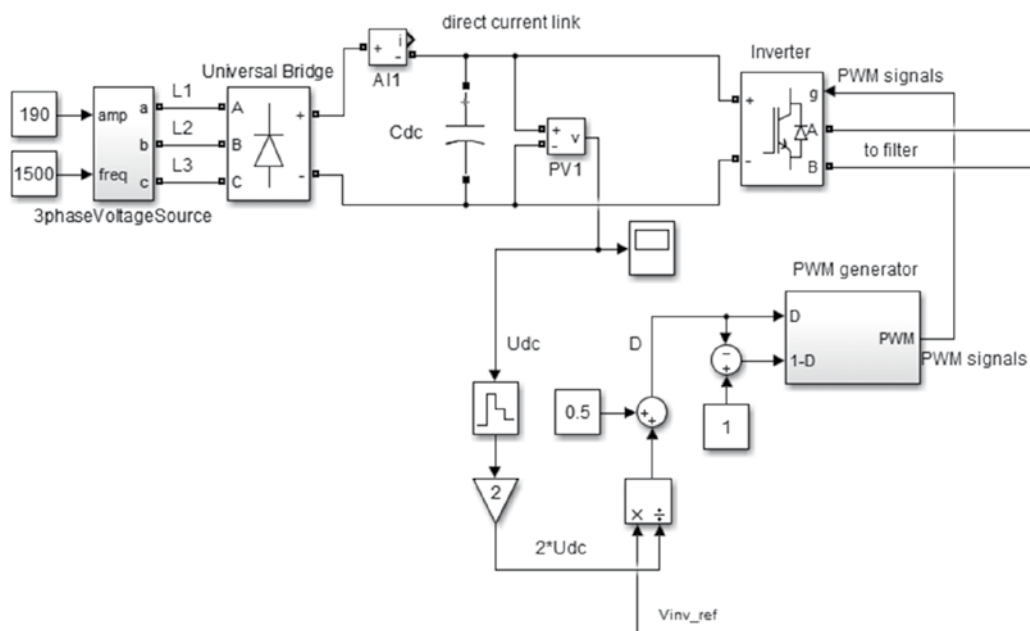


Рис. 3. Модель инвертора

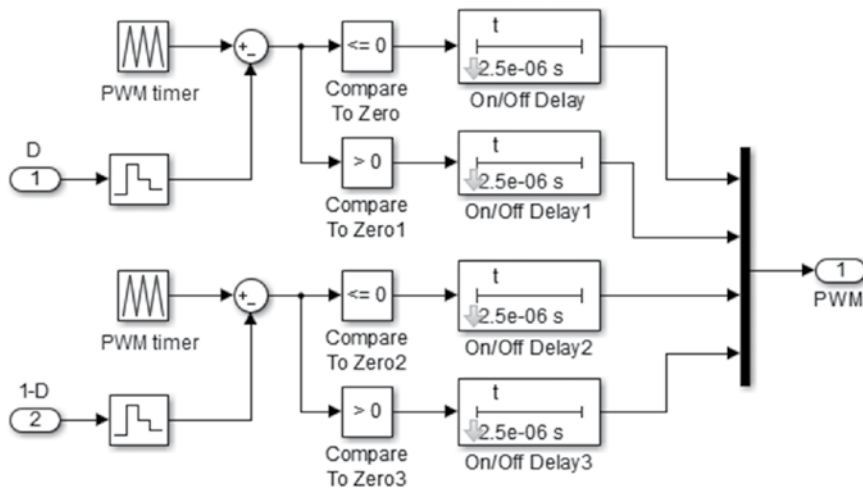


Рис. 4. ШИМ-генератор

Расчет ядра системы управления проводится на каждом периоде ШИМ. При частоте тактирования микроконтроллера 150 МГц и частоте ШИМ 25,6 кГц (64×400 Гц) на расчет системы отводится не более 5859 тактов CPU. Расчет P -интеграторов не содержит ресурсоемких математических операций и потребует не более нескольких десятков тактов. Это гораздо

меньше, чем различные служебные функции, такие как опрос аналоговых каналов, функции защит и прочее. Кроме того, данный алгоритм, в отличие от предыдущего, не требует каких-либо расчетов на частоте опроса АЦП, которая в 4 раза выше, и, следовательно, доступное процессорное время вчетверо меньше (1464 такта).

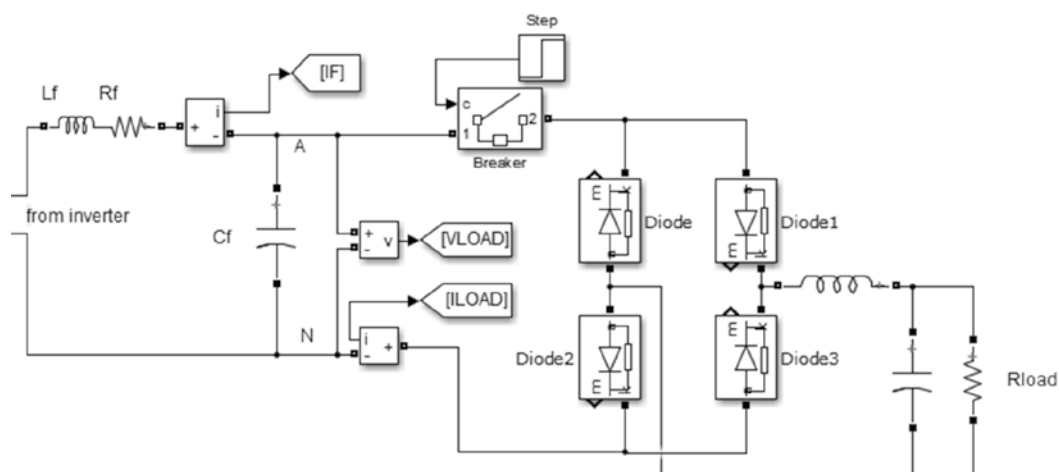


Рис. 5. Модель синусового фильтра и нелинейной нагрузки

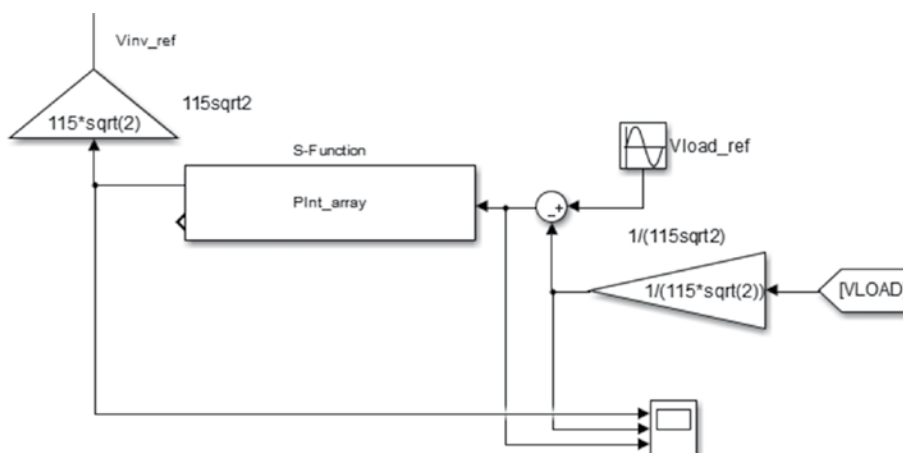


Рис. 6. Модель системы управления

Тестирование работы системы управления

Качество работы системы управления под нагрузкой оценивается по результатам моделирования. Для этого проводятся опыты приложения линейной (RL) и нелинейной (выпрямительной) нагрузок. Наиболее интересными являются следующие параметры: КГИ, амплитуда первой гармоники выходного напряжения, выходное напряжение и ток нагрузки.

Из рис. 7, 8 видно, что благодаря работе P -интегратора коэффициент гармонических искажений постепенно снижается. При одинаковых условиях эксперимента качество регулирования новой упрощенной системы управления не уступает системе с дискретным преобразованием Фурье. Точность коррекции гармонического состава новой системы оказывается даже несколько выше, чем у предшествующей. Это связано с тем, что она компенсирует все возможные источники искажений, не ограничиваясь

жестко заданным рядом высших гармоник. Все показатели удовлетворяют требованиям стандартов [4].

Выводы

В качестве вывода следует отметить, что сложные и ресурсоемкие решения не всегда оказываются эффективнее более простых. В данном случае упрощенная самообучающаяся система управления выполняет свои функции не хуже своего более сложного предшественника на базе дискретного преобразования Фурье, требуя для этого значительно меньше как вычислительных ресурсов микроконтроллера, так и трудозатрат программиста-наладчика.

Новое алгоритмическое решение может быть реализовано на той же аппаратной базе, что и предыдущее, требуется только доработка программного обеспечения.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект №15-19-20057).

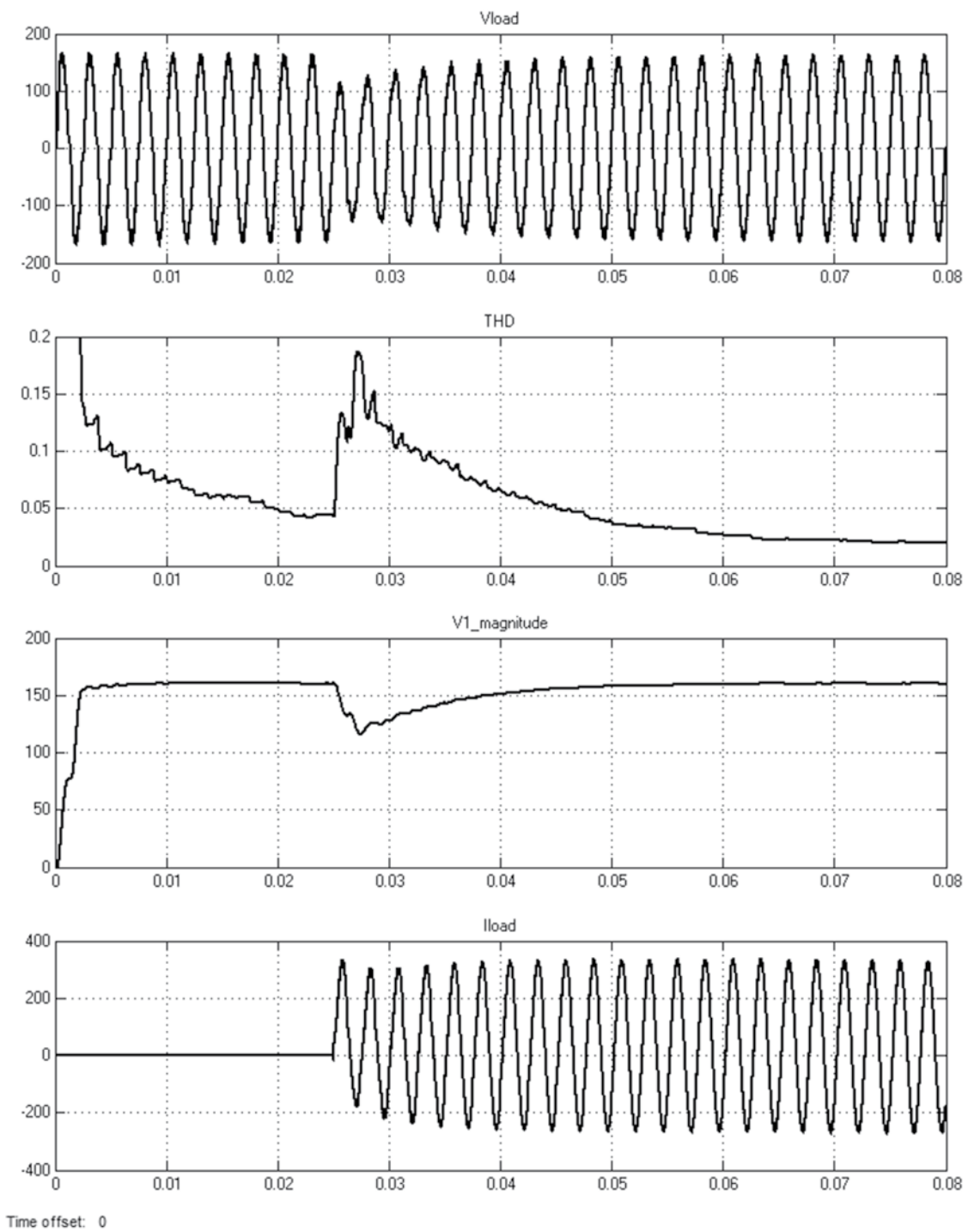


Рис. 7. Наброс активно-индуктивной нагрузки

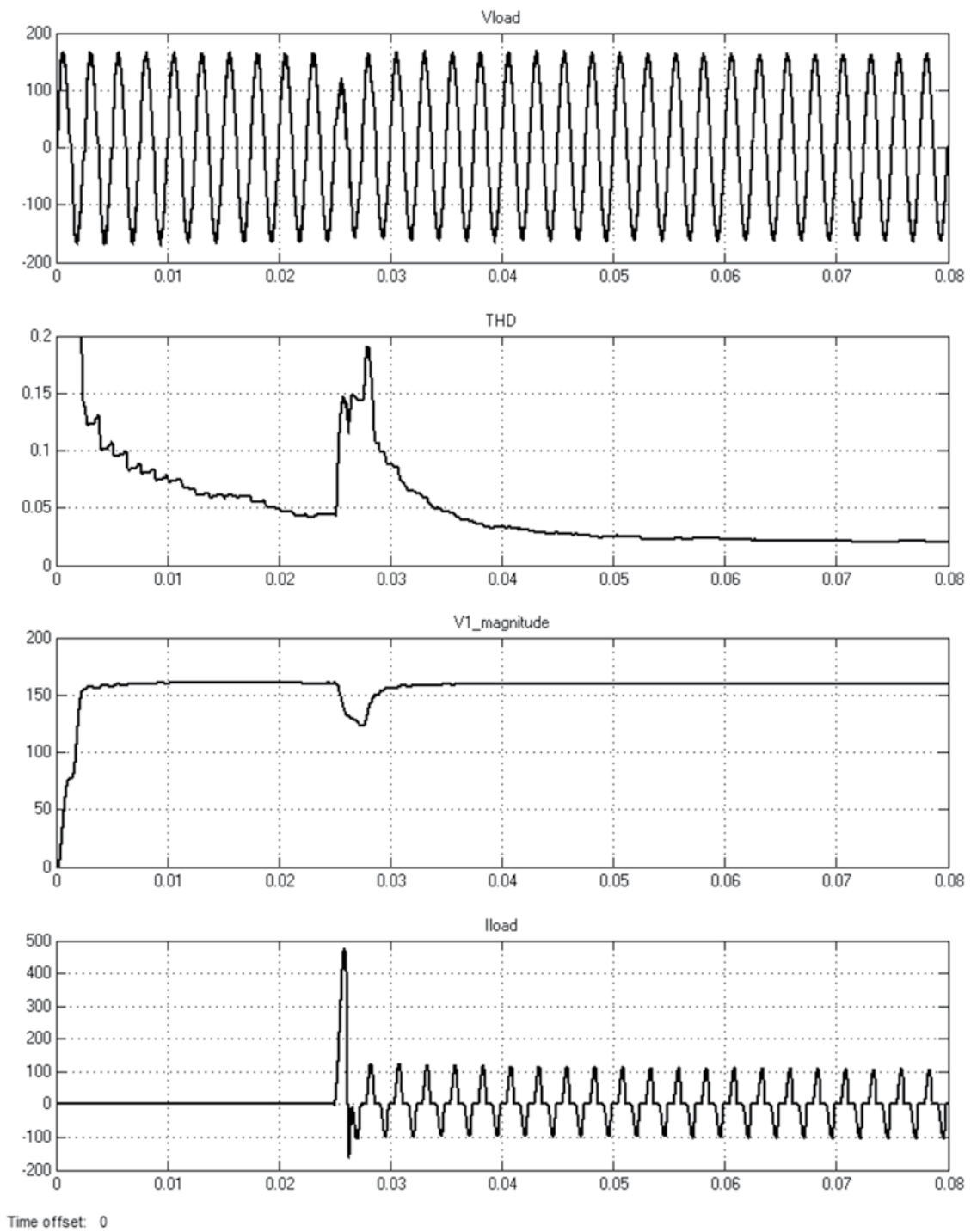


Рис. 8. Наброс выпрямительной нагрузки в размере 25 % от номинальной мощности

Литература

1. **Грузков С.А. и др.** Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
2. **Anuchin A.S., Kulmanov V.I., Belyakov Y.O.** Simulation of Power Converter Control System with Compensation of Harmonic Distortion in Output Voltage Waveform // SIBCON-2015. Omsk. 2015. Pp. 83—89.
4. **ГОСТ Р 54073—2010.** Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.
3. **Никольский А.А.** Точные самообучающиеся электроприводы станков некруглого точения. М.: Адвансед Солюшнз, 2016.
5. **Sufen Chen, Y. M. Lai, Siew-Chong Tan, Chi K. Tse.** Optimal Design of Repetitive Controller for Harmonic Elimination in PWM Voltage Source Inverters // INTELEC 07. Rome (Italy). 2007. Pp. 236—241.
6. **Youqing Wan, Furong Gao, Francis J. Doyle III** Survey on Iterative Learning Control, Repetitive Control, and Run-To-Run Control // J. Process Control Online. 2009. V. 19. Pp. 1589—1600.
7. **Steinbuch M.** Repetitive Control for Systems with Uncertain Period-time // Automatica Online. 2002. V. 38. Pp. 2103—2109.

References

1. **Gruzkov S.A. i dr.** Elektrooborudovanie Letatelnykh Apparatov. T. 1. Sistemy Elektrosnabzheniia Letatelnykh Apparatov. M.: Izd-vo MPEI, 2005. (in Russian).
2. **Anuchin A.S., Kulmanov V.I., Belyakov Y.O.** Simulation of Power Converter Control System with Compensation of Harmonic Distortion in Output Voltage Waveform. SIBCON-2015. Omsk. 2015:83—89.
4. **GOST R 54073—2010.** Sistemy Elektrosnabzheniia Samoletov i Vertoletov. Obshchie Trebovaniia i Normy Kachestva Elektroenergii. (in Russian).
3. **Nikolskii A.A.** Tochnye Samoobuchaiushchiesia Elektroprivody Stankov Nekruglogo Tocheniia. M.: Advansed Soliushnz, 2016. (in Russian).
5. **Sufen Chen, Y. M. Lai, Siew-Chong Tan, Chi K. Tse.** Optimal Design of Repetitive Controller for Harmonic

Elimination in PWM Voltage Source Inverters. INTELEC 07. Rome (Italy). 2007:236—241.

6. **Youqing Wan, Furong Gao, Francis J. Doyle III** Survey on Iterative Learning Control, Repetitive Control, and Run-To-Run Control. J. Process Control Online. 2009;19:1589—1600.

7. **Steinbuch M.** Repetitive Control for Systems with Uncertain Period-time. Automatica Online. 2002;38:2103—2109.

Сведения об авторах

Кульманов Василий Игоревич — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: KulmanovVI@mpei.ru

Анучин Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: anuchin.alecksey@gmail.com

Шпак Дмитрий Михайлович — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: disona@yandex.ru

Беляков Юрий Олегович — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: belyakovyo@gmail.com

Остриров Вадим Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

Information about authors

Kul'manov Vasilii I. — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: KulmanovVI@mpei.ru

Anuchin Aleksey S. — Ph.D. (Techn.), Head of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: anuchin.alecksey@gmail.com

Shpak Dmitriy M. — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: disona@yandex.ru

Belyakov Yuriy O. — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: belyakovyo@gmail.com

Ostrirov Vadim N. — Dr.Sci. (Techn.), professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2016