

УДК 621.314.5:681.537

СИНХРОНИЗАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

П.А. Борисов, Н.А. Поляков

Рассмотрен способ реализации управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с учетом необходимости синхронизации с питающей сетью в условиях неидеального сетевого напряжения с искажениями формы потребляемого тока. Проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink, подтвердившее работоспособность и энергетическую эффективность способа.

Ключевые слова: активный выпрямитель, векторное управление, фазовая автоподстройка частоты.

Введение

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами и обращенный на сторону сети переменного тока, который обеспечивает двунаправленный обмен энергии между питающей сетью и потребителем. В принцип работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока. Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между первичной сетью и АВН используется конденсатор силового фильтра (СФ) звена постоянного тока (ЗПТ) [1].

На сегодняшний день существует несколько подходов к управлению активными выпрямителями напряжения, наиболее перспективными из которых являются алгоритмы векторного управления с преобразованием координат. Однако для промышленных устройств необходимо учитывать неидеальный характер самой питающей сети. В связи с этим для достижения энергетической эффективности систем с трехфазными АВН в информационной подсистеме преобразователя необходимо обеспечивать фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) для синхронизации с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения. В основу предлагаемого способа реализации управления АВН заложена так называемая «силовая» ФАПЧ (Power Phase Locked Loop) [2, 3], где для синхронизации с фазой питающей сети используется фазовый детектор, реализованный на триггерах и маломощной схеме «зарядового насоса» (charge pump).

Преобразование координат

Для описания электромагнитных процессов в системах переменного тока используются следующие системы координат:

- неподвижная ортогональная система координат $\alpha\beta$;
- вращающаяся с произвольной угловой скоростью ω_k ортогональная система координат xu [3, 4].

В неподвижной системе координат $\alpha\beta$ вектор тока может быть представлен в комплексной и показательной форме (1):

$$\bar{\mathbf{I}}_{\text{H}} = I_{\alpha} + j I_{\beta} = I_m e^{j\psi} \quad (1)$$

Аналогично во вращающейся системе координат тот же вектор может быть представлен в виде

$$\bar{\mathbf{I}}_{\text{Вр}} = I_X + j I_Y = I_m e^{j(\psi - \omega_k t)} = \bar{\mathbf{I}}_{\text{H}} e^{-j\omega_k t} \quad (2)$$

Из (1) и (2) можно получить уравнения для перехода от неподвижной системы координат к вращающейся и обратно (преобразования Парка–Горева). Если принять, что I_X и I_Y – соответственно активная и реактивная составляющие обобщенного вектора сетевого тока и система синхронизирована относительно синусоиды электродвижущей силы (ЭДС) фазы A , то получим систему уравнений

$$i_{\alpha} = i_X \sin(\omega_k t) + i_Y \cos(\omega_k t), \quad (3)$$

$$i_{\beta} = -i_X \cos(\omega_k t) + i_Y \sin(\omega_k t). \quad (4)$$

Преобразование двухфазной неподвижной системы координат к трехфазной в этом случае осуществляется в соответствии с выражениями (преобразования Кларка)

$$i_A = i_{\alpha}; i_B = -(1/2)i_{\alpha} + (\sqrt{3}/2)i_{\beta}; i_C = -(1/2)i_{\alpha} - (\sqrt{3}/2)i_{\beta}. \quad (5)$$

С помощью преобразования координат появляется возможность управлять АВН по проекциям I_X и I_Y обобщенного вектора сетевого тока. На рис. 1 представлена модель системы управления, использующей этот принцип, в пакете MATLAB/Simulink. Положительным значениям I_Y соответствует режим потребления энергии из первичной сети, отрицательным – режим рекуперации. Таким образом, переход от двигательного режима в генераторный и обратно осуществляется в такой системе автоматически.

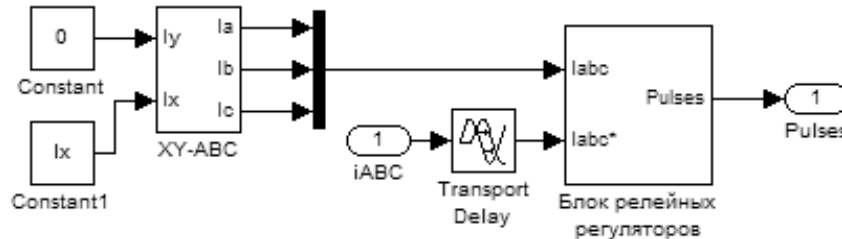


Рис. 1. Система управления АВН по проекциям обобщенного вектора сетевого тока

АВН с двухконтурной системой подчиненного регулирования

Двухконтурная система подчиненного регулирования АВН с разделением управления по проекциям обобщенного вектора сетевого тока (внутренний контур тока) и внешним контуром стабилизации напряжения конденсатора СФ ЗПТ представлена на рис. 2. Помимо вышеперечисленных блоков, в систему входят пропорциональный регулятор (П-регулятор) контура стабилизации напряжения U_c конденсатора СФ ЗПТ и блок токоограничения. Блок токоограничения является обязательным элементом системы регулирования АВН, позволяя ограничить электромагнитные нагрузки на элементы АВН на заданном уровне.

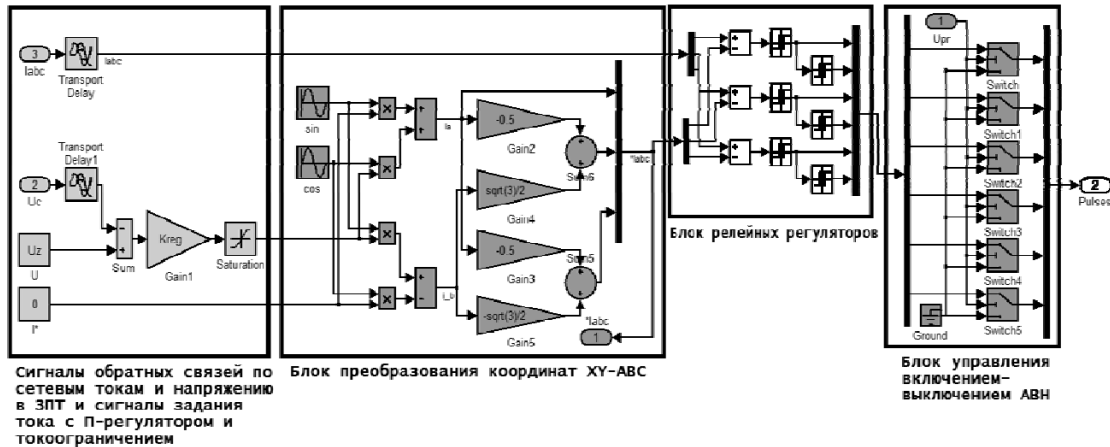


Рис. 2. Двухконтурная система подчиненного регулирования АВН

Блок преобразования координат $XY-ABC$ осуществляет преобразование проекций I_X и I_Y обобщенного вектора сетевого тока из вращающейся системы координат к трехфазной системе токов i_A, i_B, i_C в соответствии с формулами (3)–(5). Блок релейных регуляторов включает три канала, реализующих «токовый коридор», который является одним из способов обеспечения гармонической формы сетевых токов [5–7]. Блок управления включением/выключением АВН обеспечивает включение АВН в заданный момент времени.

Синхронизация фазы управления с фазой питающей сети

Непрерывная система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) сравнивает фазы эталонного и подстраиваемого генератора сигналов. Сигналы поступают на фазовый детектор (ФД), который выводит сигнал ошибки, соответствующий разности между этими фазами. Выходное напряжение ФД через фильтр нижних частот (ФНЧ) воздействует на генератор, управляемый напряжением (ГУН), включенный в обратную связь. Если выходная частота отклоняется от эталонной, то сигнал ошибки увеличивается,

воздействуя на ГУН в сторону уменьшения ошибки. В состоянии равновесия выходной сигнал фиксируется на частоте эталонного [8].

Необходимость введения ФАПЧ в систему управления АВН связана, прежде всего, с тем фактом, что присутствие несимметрии напряжений в питающей сети и искажения формы напряжения создают возмущения в системе управления, что приводит к появлению низкочастотных гармоник в составе формируемого АВН тока питающей сети [3].

В случае несинусоидального напряжения питающей сети управление следует синхронизировать с фазой его первой гармоники. Таким образом, даже при несинусоидальном напряжении тока, которые будут формировать АВН, должны совпадать по фазе с первой гармоникой фазного напряжения и иметь синусоидальную форму. При условии симметричности напряжений питающей сети достаточно синхронизировать АВН с двумя из трех фаз питающей сети.

Для решения этой задачи в систему управления АВН можно внедрить ФАПЧ (рис. 3, а) с цифровым ФД (ЦФД) на основе триггеров (рис. 3, б) и петлевой фильтр с «зарядовым насосом» (рис. 3, в). «Зарядовый насос» генерирует ток в петлевом фильтре 2-го порядка. Напряжение в ветви фильтра используется как входной сигнал ГУН. ЦФД определяет направление тока в петлевом фильтре, причем отрицательный знак тока соответствует опережению фазы, а положительный – отставанию фазы соответственно. Обычно ЦФД определяет моменты совпадения пересечения с нулем эталонного и подстраиваемого сигналов. Если эталонный сигнал достигает положительного значения раньше подстраиваемого (т.е. подстраиваемый сигнал отстает), то включается положительный «зарядовый насос», который сохраняется до тех пор, пока будет наблюдаться отставание вырабатываемого ГУН подстраиваемого сигнала от эталонного [2].

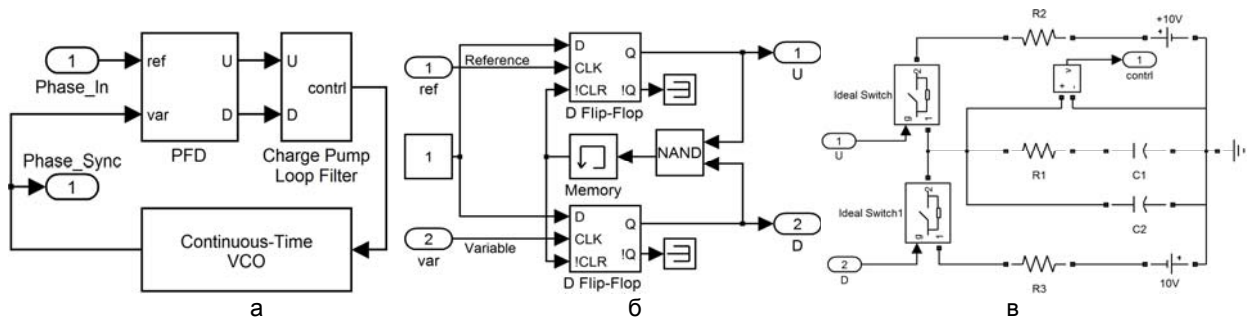


Рис. 3. Устройство блока ФАПЧ (а); ЦФД (б); зарядовый насос (в)

Передаточная функция фильтра будет иметь вид

$$G(p) = \frac{p \cdot R_1 \cdot C_1 + 1}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 + p \cdot (C_1 + C_2)}, \quad (6)$$

где $C_2 = 17$ пФ; $C_1 = 82$ пФ; $R_1 = 23$ кОм.

Для проверки работоспособности такой ФАПЧ был использован сигнал, в состав которого были включены гармоники вплоть до 25-й в соответствии с [9]. Значения допустимых гармонических составляющих напряжения в процентах от первой гармоники приведены в таблице.

Номер гармоники n	Нечетные гармоники, некрatные 3, при $U_{ном}$, кВ		Нечетные гармоники, кратные 3, при $U_{ном}$, кВ			Четные гармоники при $U_{ном}$, кВ		
	0,38	6–20	Номер гармоники n	0,38	6–20	Номер гармоники n	0,38	6–20
5	6,0	4,0	3	5,0	3,0	2	2,0	1,5
7	5,0	3,0	9	1,5	1,0	4	1,0	0,7
11	3,5	2,0	15	0,3	0,3	6	0,5	0,3
13	3,0	2,0	21	0,2	0,2	8	0,5	0,3
17	2,0	1,5	>21	0,2	0,2	10	0,5	0,3
19	1,5	1,0				12	0,2	0,2
23	1,5	1,0				>12	0,2	0,2
25	1,5	1,0						
>25	$0,2 + 1,3 \times 25/n$	$0,2 + 0,8 \times 25/n$						

Таблица. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения в процентах

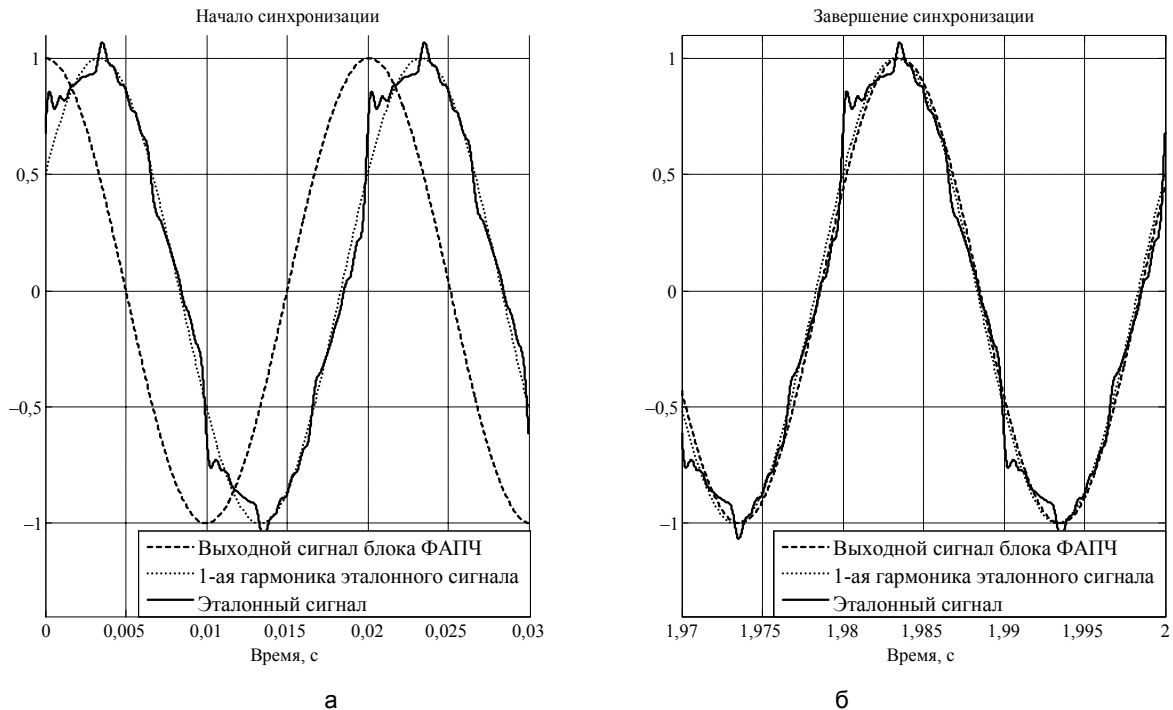


Рис. 4. Начало синхронизации (а); достижение синхронизации (б) (в относительных единицах)

Нормально допустимые значения, приведенные для n , равных 3 и 9, относятся к однофазным электрическим сетям. В трехфазных трехпроводных электрических сетях эти значения вдвое меньше приведенных в таблице. Результаты моделирования системы синхронизации с питающей сетью для случая соответствия сетевого напряжения требованиям [9] приведены на рис. 4. Блок ФАПЧ осуществляет синхронизацию сигнала задания с первой гармоникой сетевого напряжения за 2 с. Однако следует отметить, что полуторакратное превышение амплитуд высших гармоник в сетевом напряжении, т.е. при не соответствии требованиям [9], приводит к невозможности осуществить захват фазы.

Пример внедрения такой системы в структуру системы управления АВН приведен на рис. 5. Входным сигналом для блоков ФАПЧ служат значения напряжений в фазах u_A и u_B . Синхронизация с первой гармоникой напряжения третьей фазы u_C не требуется, поскольку синусоидальный сигнал задания третьей фазы C формируется на основе сигналов, вырабатываемых ФАПЧ для фаз A и B . Амплитуда задания формируется на основе обратной связи по напряжению в ЗПТ. В ней также учитывается токоограничение и дискретизация сигнала задания с частотой 1кГц.

В данном случае преобразование координат $XY-ABC$ не требуется, так как за счет синхронизации по фазе с напряжением питающей сети автоматически обеспечивается режим, в котором реактивная составляющая полной мощности отсутствует. За счет этого снижаются требования к вычислительным ресурсам микроконтроллера. Таким образом, в отличие от управления АВН по проекциям обобщенного вектора сетевого тока [10], преобразование сводится к формированию сигнала задания тока третьей фазы на основе синхронизированного задания первой и второй фазы.

Результаты моделирования приведены на рис. 6.

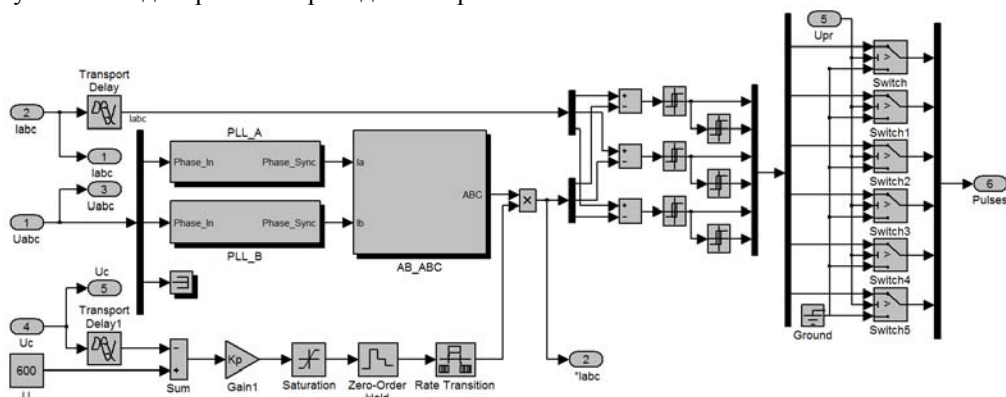


Рис. 5. Блок управления АВН с синхронизацией с фазными напряжениями

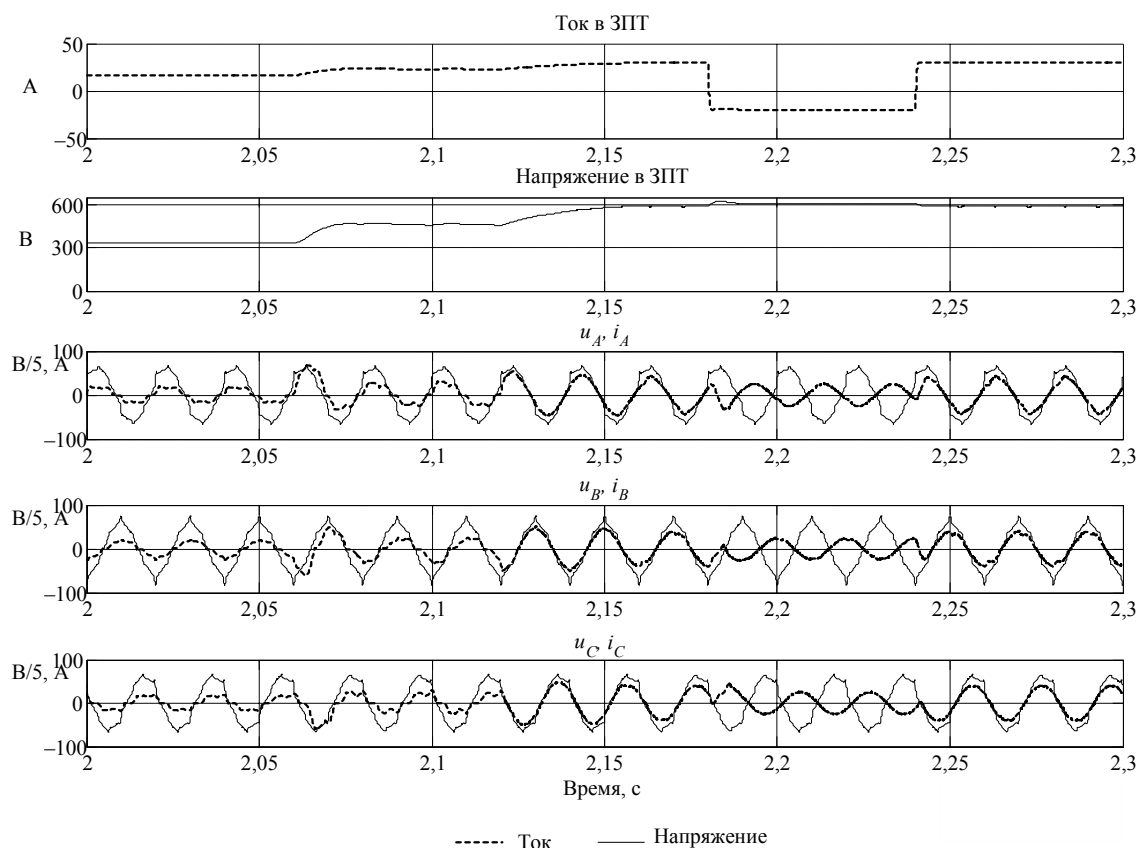


Рис. 6. Результаты моделирования электромагнитных процессов в АВН: (сверху – вниз) ток в ЗПТ, А; напряжение в ЗПТ, В; u_A , В/5, i_A , А; u_B , В/5, i_B , А; u_C , В/5, i_C , А

Система синхронизируется с питающей сетью в течение первых двух секунд, процесс синхронизации не отличается от рассмотренного ранее. При пуске ток заряда конденсатора СФ протекает через неуправляемый выпрямитель, структурно входящий в схему АВН, в результате при пуске наблюдаются процессы, характерные для традиционных выпрямителей [11]. При моделировании в момент времени $t = 2,06$ с шунтируются пусковые резисторы. АВН вступает в работу в момент $t = 2,12$ с, при этом ЭДС нагрузки равна нулю. АВН переходит из режима потребления энергии в режим рекуперации при $t = 2,18$ с, когда с блока «Repeating Sequence» подается противоЭДС нагрузки, равная 1000 В. АВН возвращается в режим потребления энергии из первичной сети в момент $t = 2,24$ с, когда противоЭДС нагрузки становится равной нулю.

Заключение

Проведенное моделирование подтверждает работоспособность предложенной системы управления активного выпрямителя напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты с «зарядным насосом» в условиях питающей сети, соответствующей требованиям [9]. Показано, что в такой системе отсутствует реактивная составляющая полной мощности, как и в случае с работой активного выпрямителя напряжения в идеальной сети. При этом за счет применения фазовой автоподстройки частоты из управления может быть исключено преобразование координат $XY-ABC$.

Следует отметить, что такая система работоспособна только при условии соответствия гармонического состава напряжений в фазах питающей сети требованиям [9]. Значительное увеличение амплитуд высших гармоник относительно первой приводит к невозможности захвата фазы и неустойчивости системы управления активного выпрямителя напряжения.

Литература

1. Борисов П.А., Седнев А.К. Математическое моделирование электропривода постоянного тока с активным выпрямителем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 3 (61). – С. 35–41.
2. Giorgia Zucchelli. Phase Locked Loop tutorial – MATLAB Central, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14868-phase-locked-loop-tutorial>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.01.2012).

3. Mongkol Konghirun. A Three-Phase Space-Vector Based PWM Rectifier with Power Factor Control // Power Conversion Conference. – Nagoya, 2007. – P. 57–61.
4. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
5. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
8. Акимов В.Н. Системы фазовой синхронизации. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.
9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.1999. – М.: Госстандарт, 1998. – 33 с.
10. Борисов П.А., Киреев А.А., Поляков Н.А. Моделирование системы управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с преобразованием координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 2. – С. 59–64.
11. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения // Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» (МКЭЭЭ-2003). – Ч. I. – Крым, Алушта, 2003. – С. 727–730.

- Борисов Павел Александрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru
- Поляков Николай Александрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Polyakov.n.a@gmail.com