

Применение регулятора тока нулевой последовательности для векторного управления трехфазным двигателем с изолированными обмотками

Zero sequence current controller for vector control of three-phase motor with isolated windings

При организации векторного управления трехфазным двигателем с изолированными обмотками возникает проблема влияния мертвого времени инвертора на форму токов фаз. Два регулятора токов по ортогональным осям d и q принципиально не могут компенсировать эти искажения. Статья рассказывает о применении дополнительного регулятора тока нулевой последовательности, который устраняет данную проблему.

Ключевые слова: изолированные обмотки, регулятор тока нулевой последовательности, векторное управление.

When vector control of three-phase motor is used with isolated windings connection type appears the problem of the influence of the dead time of the inverter, which cannot be compensated by the two current controllers on orthogonal axes d and q . This leads to considerable distortions of the current shape. The article tells about the application of an extra current controller of zero sequence, which fixes this problem.

Key words: isolated windings, zero sequence current controller, vector control.

Введение

В ряде случаев для трехфазного регулируемого электропривода переменного тока целесообразно применять инверторы из шести стоек, где каждая обмотка двигателя включается в схему полного моста (рис.1). Такое

соединение позволяет повысить напряжение на двигателе, а, соответственно, и мощность в 1.7 раза по сравнению с классическим инвертором (из трех стоек и соединением обмоток в звезду).

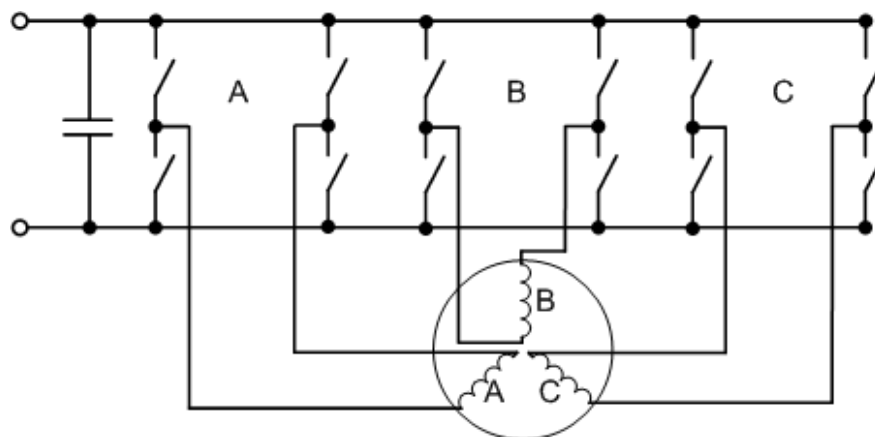


Рис.1. Инвертор из шести IGBT стоек с подключенным трехфазным двигателем.

Целью работы была организация векторного управления трехфазным двигателем с синусоидальной ЭДС при использовании данного инвертора.

Проблема классического подхода

Так как векторное управление подразумевает регулирование напряжения на фазах двигателя с помощью ШИМ, необходимо определить тип ШИМ. Для данного инвертора могут применяться два основных способа: коммутация одной стойки за период ШИМ или коммутация двух стоек. Не углубляясь в их рассмотрение, можно сказать, что первый способ (коммутация одной стойки за период) более выгоден с точки зрения потерь в инверторе, поэтому в дальнейшем примем, что будет использоваться этот способ. Однако такой тип ШИМ при малых напряжениях имеет сильно выраженные искажения за счет влияния «мертвого» времени.

Для практических испытаний был использован стенд, включающий инвертор, собранный по схеме рис.1, вентильно-индукторный двигатель мощностью 2,2 кВт с внешним возбуждением (с точки зрения управления – синхронная машина с активным моментом), а также система управления на

базе сигнального микроконтроллера TI TMS320F2810. На первом этапе испытаний была использована классическая система векторного датчикового управления [2] с двумя регуляторами токов статора в осях d и q. На осциллограмме рис.2 показаны токи статора I_a , I_b , I_c при работе такой замкнутой по току структуры управления на низкой (околонулевой) скорости (частота тока - 4 Гц, прикладываемое напряжение около 0,2% от номинала). Кроме того, на осциллограмму добавлен вычисленный ток нулевой последовательности I_0 . Даже без применения специальных методов анализа видно, что форма тока далека от желаемой синусоидальной, искажения значительны, а сумма токов во всех фазах не равна нулю (протекают токи нулевой последовательности).

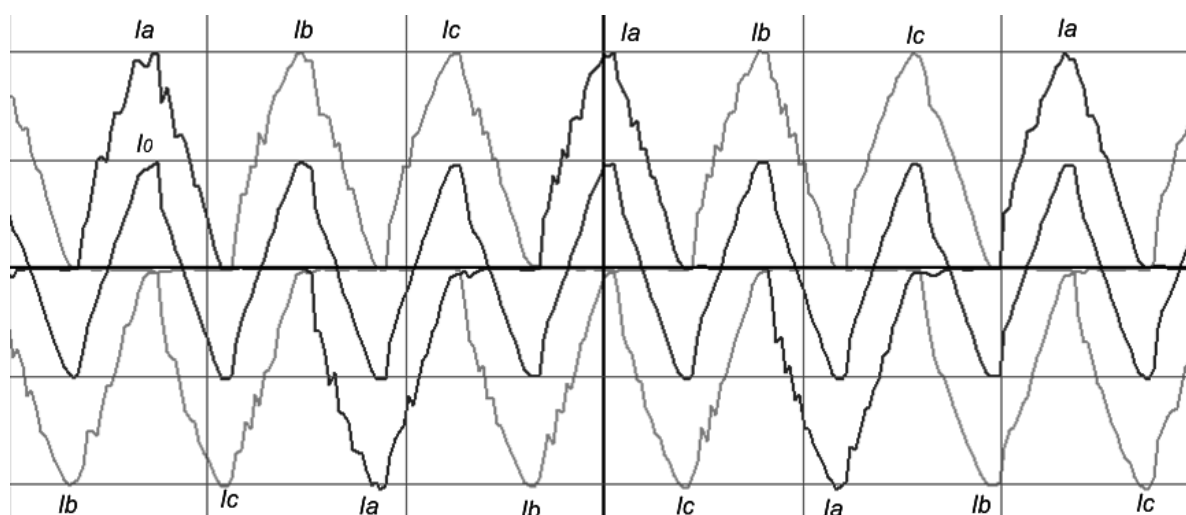


Рис.2. Токи статора I_a , I_b , I_c , а также вычисленный ток нулевой последовательности I_0 при работе классической замкнутой по току структуры управления на низкой (околонулевой) скорости

Было исследовано и подтверждено предположение, что данные искажения токов вызваны за счет влияния «мертвого» времени: при изменении величины мертвого времени величина искажений токов пропорционально изменялась. В классическом инверторе из трех стоек и соединением обмоток в звезду искажения мертвого времени также присутствуют, однако компенсируются работой двух регуляторов тока статора. Это обеспечивается тем, что там отсутствуют напряжения нулевой последовательности, за счет чего возможны взаимные преобразования между

трехфазной и двухфазной системами координат без потери информации. В данном же случае искажения не могли быть полностью скомпенсированы, так как в данном инверторе возможно самопроизвольное появление напряжения нулевой последовательности (например, положительное напряжение в одной фазе и нулевые в других), вызванные влиянием мертвого времени. Два регулятора в декартовых осях координат не могли его компенсировать, так как при преобразовании из трехфазной системы координат в двухфазную была не учтена информация о токах нулевой последовательности.

Решение проблемы путем введения дополнительного регулятора

Для решения этой проблемы с данным типом инвертора было решено применить дополнительно регулятор тока нулевой последовательности, а в модуле ШИМ, управляющим инвертором, предусмотреть дополнительный канал воздействия, регулирующий напряжение нулевой последовательности. На рис.3 показана структура векторной датчиковой системы управления синхронной машиной с дополнительным регулятором нулевой последовательности.

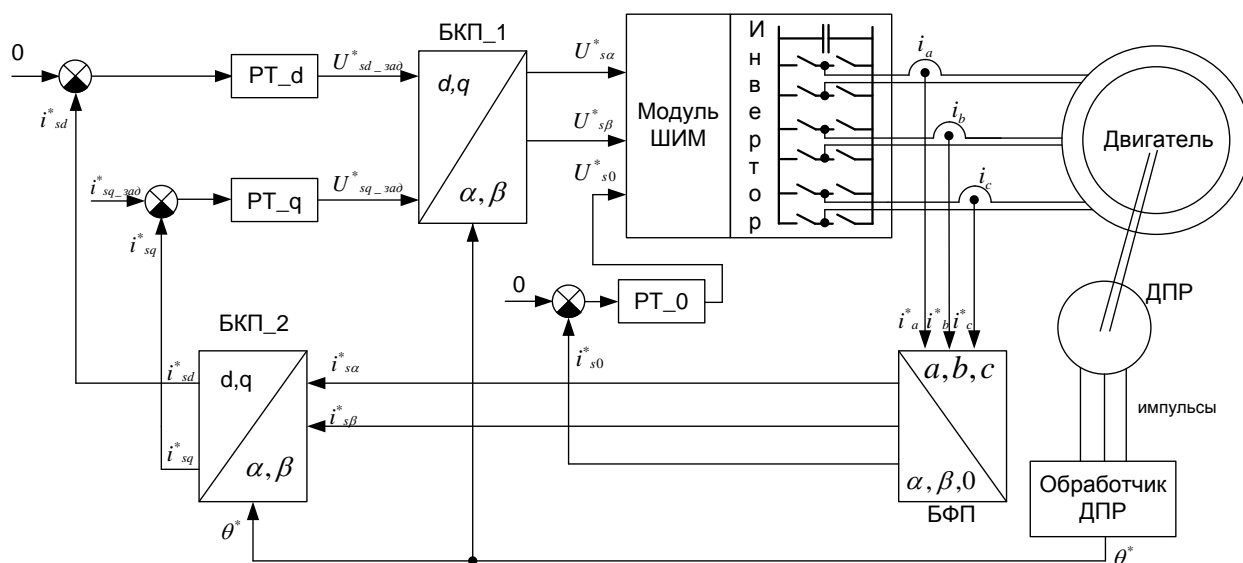


Рис.3. Структура векторной датчиковой системы управления синхронной машиной с дополнительным регулятором нулевой последовательности

Большая часть системы управления функционирует во вращающейся системе координат (декартовой), жестко связанной с ротором двигателя. Она имеет две оси: ось d , ориентированную по потоку ротора и ось q , перпендикулярную ей. Ток по оси q создает момент двигателя. Так как возбуждение двигателя внешнее, ток по оси возбуждения d задается равным нулю. Для преобразования от статических осей координат α и β , связанных с обмотками статора и неподвижных, к осям d q , служат блоки координатных преобразований БКП_1 и БКП_2.

Задание тока $i_{a_зад}^*$ формирующего момент двигателя, попадает на сумматор ПИ-регулятора тока по оси q (РТ_ q), выходом которого (регулятора) является задание напряжения по оси q . Аналогично функционирует регулятор тока по ортогональной оси d (РТ_ d), задание тока на входе которого нулевое.

Напряжения с регуляторов токов поступают на БКП_1 (поворот системы координат на угол Θ), а затем заводятся на инвертор напряжения. Измеренные значения токов фаз двигателя i_a^* , i_b^* , i_c^* поступают на вход блока фазных преобразований БФП. В этом блоке они преобразуются из трехфазной системы координат в двухфазную декартовую систему координат с дополнительным выделением токов нулевой последовательности α , β , 0. Токи $i_{s\alpha}^*$, $i_{s\beta}^*$ поступают на блок координатных преобразований БКП_2, поворачивающих систему координат на угол Θ . На выходе БКП_2 получают фактические значения токов в системе координат d,q , ориентированной по потокосцеплению ротора. Эти значения используются в качестве сигналов обратных связей на входах регуляторов токов по осям d,q .

Отличием данной структуры от классической является, во-первых, наличие регулятора тока нулевой последовательности РТ_0, а во-вторых, модуля ШИМ, позволяющего отработать задание нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности i_{s0}^* поступает на сумматор регулятора тока нулевой последовательности РТ_0. На своем

выходе регулятор вырабатывает задание напряжения нулевой последовательности, которое поступает на модуль ШИМ, управляющий ключами инвертора. Модуль ШИМ содержит в себе фазные преобразования, обратные тем, которые производятся в БФП, т.е. получает из заданий напряжения U_{sa}^* , U_{sb}^* , U_{sc}^* задания по трем фазам U_{sa}^* , U_{sb}^* , U_{sc}^* , которые затем воспроизводятся соответствующих на мостовых схемах инвертора. Математическое представление выражений блоков БФП и БКП могут быть найдены в [1]. Фазные преобразования должны осуществляться по полным формулам, учитывающим нулевую последовательность

$$x_{1\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \right);$$

$$x_{1\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \right);$$

$$x_{10} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} x_{1a} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1c} \right);$$

$$x_{1a} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right);$$

$$x_{1b} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right);$$

$$x_{1c} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \right).$$

Работа системы управления с тремя регуляторами токов представлена на рис.4. Частота вращения и режим работы двигателя аналогичен режиму, при котором снималась осциллограмма рис.3, но за счет действия регулятора тока нулевой последовательности форма токов близка к синусоидальной. Кроме улучшения гармонического состава также снижены омические потери и

потери в ключах инвертора за счет уменьшения амплитуды протекающих токов в фазах (без изменения амплитуды суммарного вектора тока).

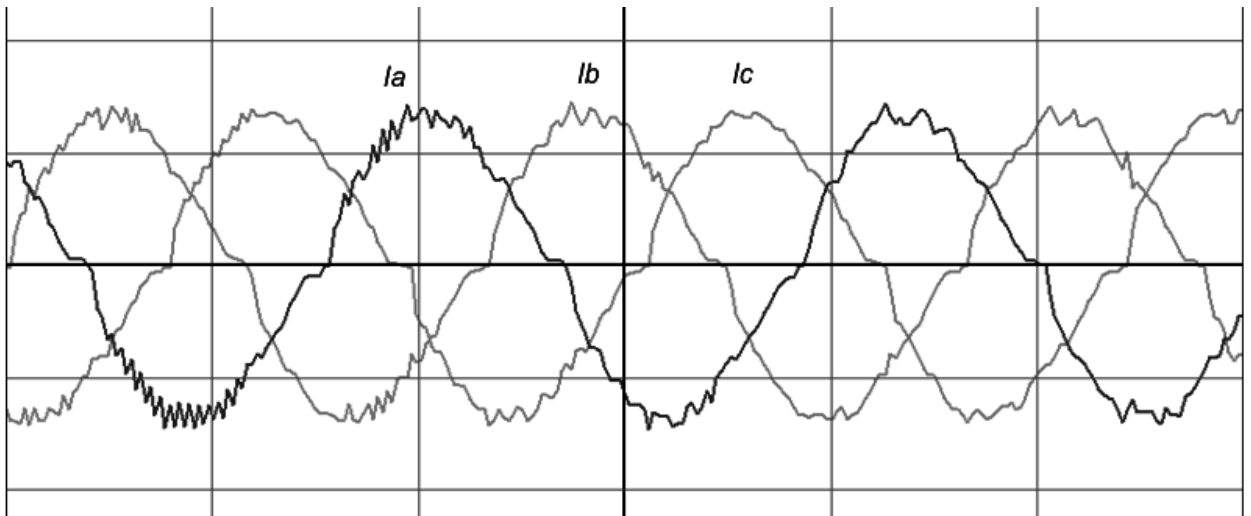


Рис.4. Токи статора I_a , I_b , I_c при работе замкнутой по току структуры управления на низкой (околонулевой) скорости с регулятором нулевой последовательности

С повышением скорости вращения двигателя и соответствующим увеличением ЭДС, а значит и прикладываемого напряжения, влияние мертвого времени инвертора уменьшается. Так, на частоте тока 60 Гц и величине напряжения 4% от номинала влияние искажений значительно уменьшено, и даже без регулятора нулевой последовательности гармонический состав улучшается (рис.5).

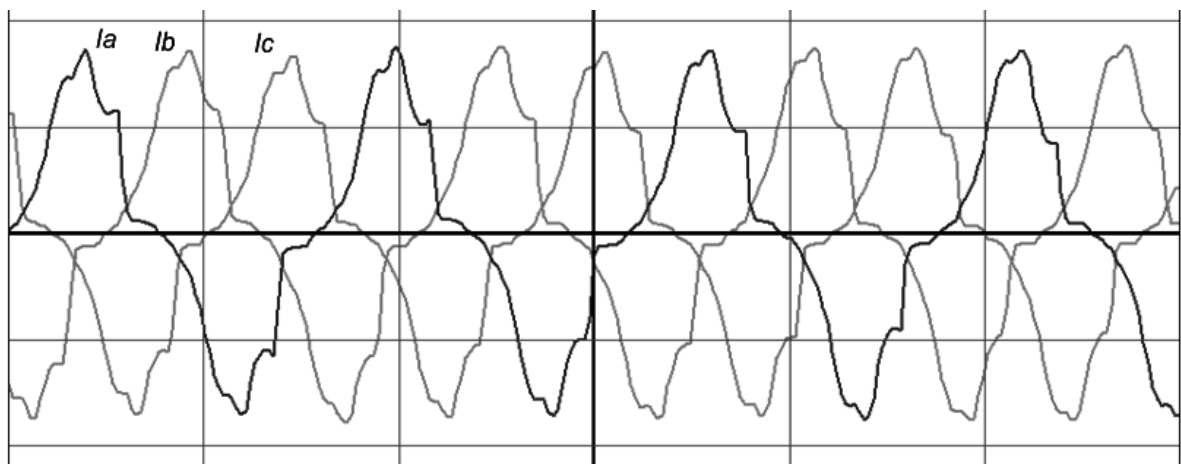


Рис.5. Токи статора I_a , I_b , I_c при работе замкнутой по току структуры управления на частоте 60Гц без регулятора нулевой последовательности

Наличие регулятора нулевой последовательности на такой частоте не приносит заметного дополнительного улучшения, так как пропускной способности контура этого регулятора не хватает (в данном конкретном случае) для полной компенсации высокочастотных гармоник искажений, вызванных влиянием мертвого времени (рис.6).

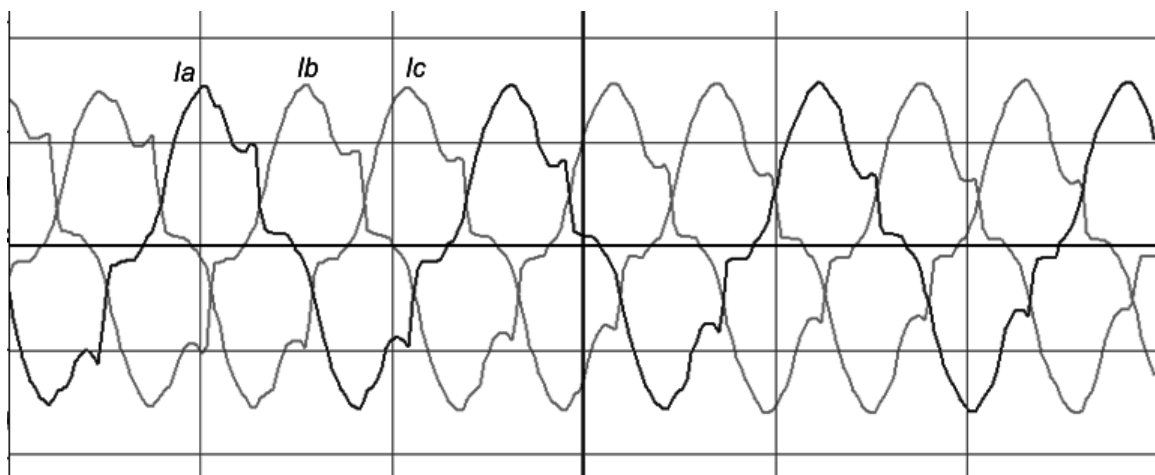


Рис.6. Токи статора I_a , I_b , I_c при работе замкнутой по току структуры управления на частоте 60Гц с регулятором нулевой последовательности

С дальнейшим разгоном двигателя (частота тока - 340 Гц, напряжение - 23% от номинала) влияние мертвого времени практически незаметно и уменьшается с дальнейшим разгоном, включение регулятора нулевой последовательности не отражается на форме тока (рис.7).

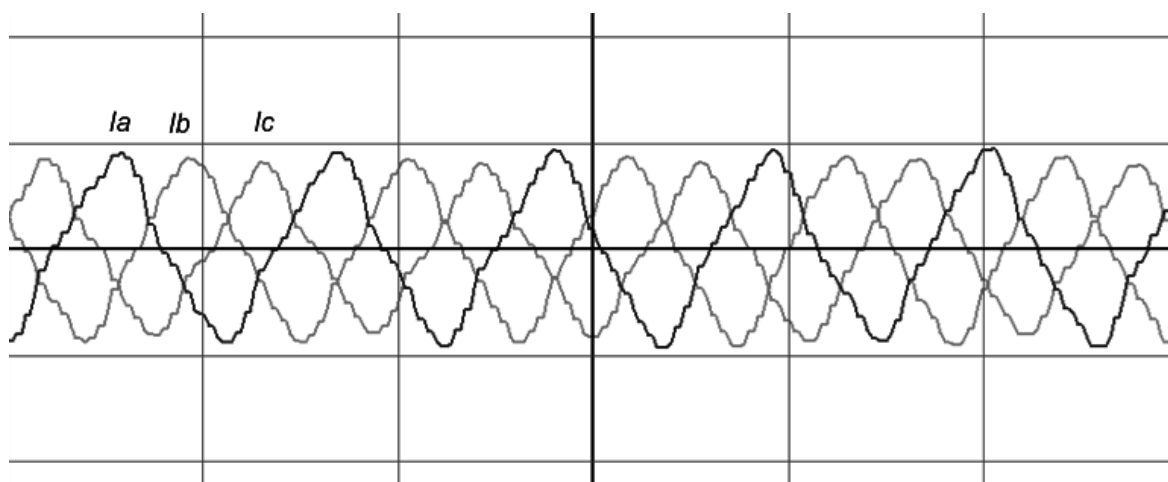


Рис.7. Токи статора I_a , I_b , I_c при работе замкнутой по току структуры управления на частоте 340Гц без регулятора нулевой последовательности

Выводы

Раздельное регулирование фаз машины при низких напряжениях на питающем инверторе вызывает протекание токов нулевой последовательности при применении классической замкнутой по току системы управления с двумя регуляторами токов. Введение третьего регулятора, обеспечивающего регулирование токов нулевой последовательности, исправляет ситуацию: форма токов становится близка к заданной (синусоидальной). Однако быстродействие регулятора ограничено, и на высоких частотах, если искажения мертвого времени все еще присутствуют, регулятор не полностью справляется с задачей. На высоких напряжениях инвертора (например, 20% и выше) искажения мертвого времени перестают оказывать заметное влияние, гармонический состав токов улучшается и без помощи дополнительных мер. Таким образом, введение регулятора нулевой последовательности необходимо при соблюдении следующих условий:

- 1) Раздельное управление фазами (изолированные обмотки).
- 2) Количество фаз больше двух.
- 3) Искажения напряжения, вызванные влиянием мертвого времени, велики.
- 4) Требуется возможность работы привода на низких скоростях с малым напряжением и большой нагрузкой.

Под перечисленные условия попадает, в основном, транспортное применение приводов (например, при движении в гору на низкой скорости), а также класс сервоприводов.

Список литературы

1. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учеб. для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704с.

2. **Козаченко В.Ф., Анучин А.С., Жарков А.А., Дроздов А.В.** Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением // «Компоненты и технологии», №8, -2004. – С. 166-172.

Автор: Лашкевич Максим Михайлович окончил в 2009 г. кафедру АЭП МЭИ. Аспирант кафедры. С 2007 г. сотрудник ООО "НПФ Вектор" (инженер-программист).

Тел.: +7-495-362-7151

e-mail: maxsoftpage@yandex.ru