

## **Анализ характеристик двухкоординатной системы стабилизации и наведения оптико-электронного модуля**

О.В. Горячев, А.В. Чадаев

### **Аннотация**

Проводится анализ характеристик двухкоординатной системы стабилизации и наведения оптико-электронного модуля с различными алгоритмами управления при учете реальных параметров блока инерциальных чувствительных элементов.

### **Ключевые слова**

ПИД-алгоритм; квазиоптимальный по быстродействию алгоритм; блок инерциальных чувствительных элементов

К приводам наведения и стабилизации, работающим на подвижном основании предъявляют жесткие требования по качеству переходных процессов и точности отработки входных сигналов. Обеспечение заданных требований возможно на основе реализации алгоритмов управления, позволяющих оптимизировать характеристики приводов по совокупности критериев качества с учетом реализации предельных динамических возможностей исполнительных двигателей и ограничения мощности первичного источника энергии. Необходимым условием синтеза регулятора, реализующего управление, близкое к оптимальному, является наличие математической модели объекта управления, адекватной функционированию объекта в основных режимах работы и учитывающей как процессы в силовой системе привода, так и характеристики используемых информационно-измерительных элементов. В качестве информационно-измерительных элементов в приводах наведения и стабилизации, работающих на подвижном основании, как правило, используются блоки инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ), представляющие собой достаточно сложные динамические системы. В связи с этим синтез алгоритмов управления и анализ характеристик привода должен проводиться с учетом реальных характеристик БИЧЭ. Кроме того, учитывая цифровую реализацию алгоритмов управления и

фильтрации, параметры БИЧЭ оказывают не только существенное влияние на характеристики приводов наведения и стабилизации, но и в принципе определяют возможность реализации алгоритмов управления. В данной статье проводится анализ характеристик двухкоординатной системы стабилизации и наведения опико-электронного модуля с различными алгоритмами управления при учете реальных параметров БИЧЭ.

БИЧЭ предназначен для измерения угловых скоростей вращения и ускорений линейных перемещений объекта управления по трем ортогональным осям. Прибор включает 3 микромеханических датчика угловой скорости (ДУС) относительно трех ортогональных осей и 3 микромеханических акселерометра, производящих измерения по трем ортогональным осям. В данной статье остановимся на рассмотрении принципа функционирования БИЧЭ в качестве датчика угловой скорости по одной из осей. БИЧЭ, с точки зрения обработки сигнала от инерциального датчика, реализует следующий алгоритм, заявленный разработчиком:

1. Аналоговый выходной сигнал датчиков фильтруется антиалиасинговыми фильтрами и поступают на вход АЦП.
2. Данные из АЦП, оцифрованные с частотой  $f_{\text{АЦП}}$  фильтруются цифровым ИР фильтром.
3. Прореженные в  $n$  раз выходные данные из фильтра нормируются при помощи калибровочных матриц. Из полученных значений формируются выходные пакеты данных прибора, которые на частоте  $f_{\text{Выд}}$  выдаются наружу. Задержка между данными на выходе фильтра и на выходе прибора составляет  $\tau$  мс.

Для решения задач анализа влияния параметров БИЧЭ на характеристики приводов аппаратуры целеуказания, наведения и стабилизации (АЦНС) необходимо располагать математической моделью, учитывающей структуру и характеристики сигналов реального БИЧЭ. В соответствии с приведенным выше реализуемым алгоритмом обработки сигнала предлагается следующая структурная схема БИЧЭ:

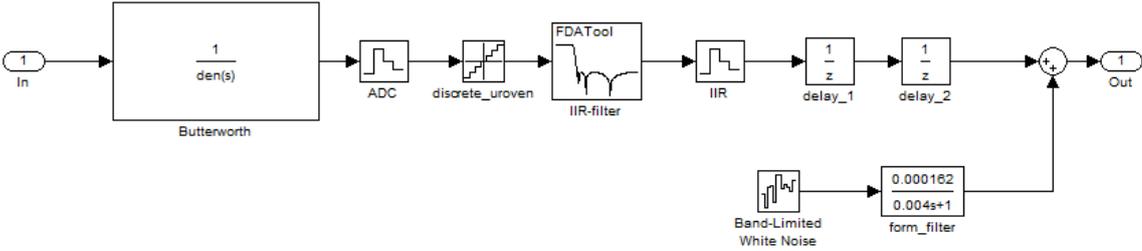


Рис.1. Структурная схема модели БИЧЭ

В схеме на рис.1 изображены блоки, выполняющие следующие функции:

1. Butterworth – моделирование антиалиасингового фильтра Баттерворта
2. ADC, discrete\_uroven – моделирование АЦП: введение такта дискретизации по времени и шага дискретизации по уровню.
3. IIR-filter – моделирование цифрового IIR-фильтра.
4. IIR – моделирование дискретности выдачи данных с IIR-фильтра по времени.
5. delay\_1, delay\_2 – моделирование задержки между сигналами на выходе IIR-фильтра и выходе прибора.
6. Band-Limited White Noise, form\_filter – моделирование случайной шумовой составляющей на выходе прибора.

Рассмотрим характеристики приводов АЦНС с различными алгоритмами управления и проанализируем влияние, оказываемое на них характеристиками БИЧЭ.

1. ПИД-алгоритм управления.

Синтез ПИД-алгоритма управления сводится к выбору корректирующего устройства, реализация которого позволяет получить систему, удовлетворяющую требованиям технического задания. В качестве корректирующего фильтра для скоростного контура следящей системы предлагается использование изодромного звена.

Изодромное звено имеет вид:

$$W_{ИЗ}(p) = K_{ИЗ} \cdot \frac{T_{ИЗ}p + 1}{p}$$

Фильтр вносит в контур астатизм первого порядка, что сводит к нулю ошибку при отработке ступенчатых входных сигналов по скорости. Для получения максимального коэффициента по контуру постоянная времени изодромного звена выбирается равной электромеханической постоянной времени, то есть  $T_{ИЗ}$  компенсирует наибольшую постоянную времени в передаточной функции «двигатель-нагрузка». Суммарная фазовая характеристика не пересекает  $-180^\circ$ , поэтому при достаточно больших коэффициентах контур устойчив. Коэффициент усиления фильтра должен быть подобран, исходя из требований по времени регулирования при отработке ступенчатого скоростного сигнала и точности стабилизации АЦНС в условиях качки, методом прямого моделирования Simulink схемы.

В качестве фильтра в позиционном контуре используется безынерционное звено, коэффициент передачи которого выбран методом прямого моделирования Simulink-схемы, исходя из условия обеспечения требуемого качества переходного процесса.

Результаты моделирования привода с неидеальным БИЧЭ приведены на рис.2-5:

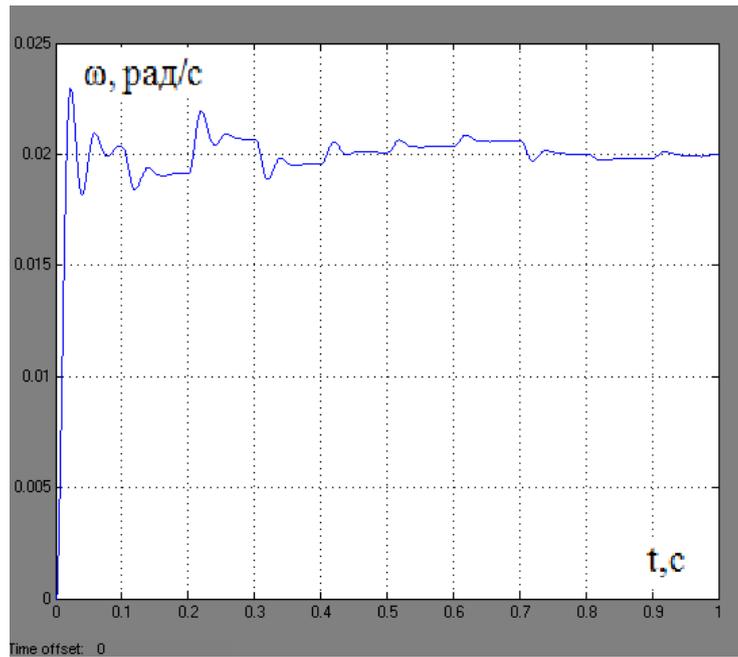


Рис.2. Обработка ступенчатого сигнала по скорости с амплитудой 0.02 рад/с.

Характеристики переходного процесса на рис.2: время регулирования 0.1 сек, перерегуливание 15%.

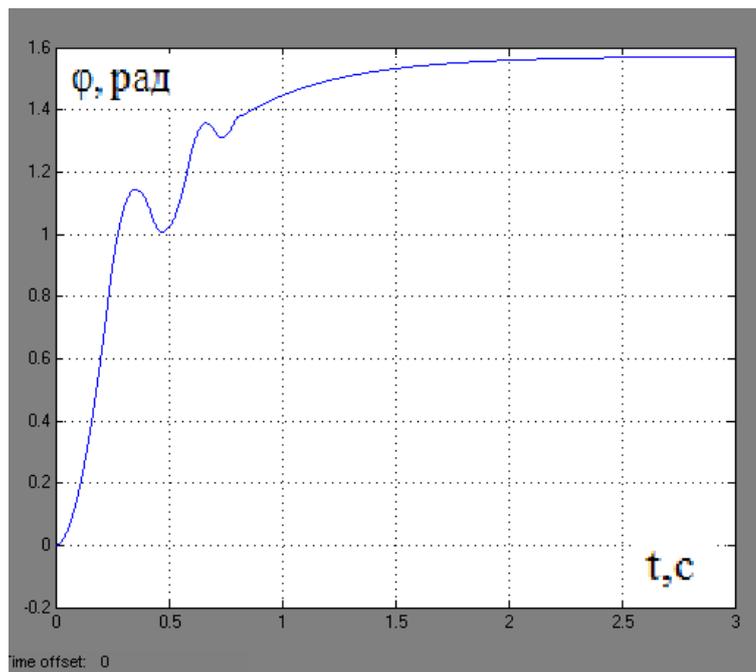


Рис.3. Обработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1.57 рад.

Характеристики переходного процесса на рис.3: время регулирования 2.7 сек, перерегуливание 0%.

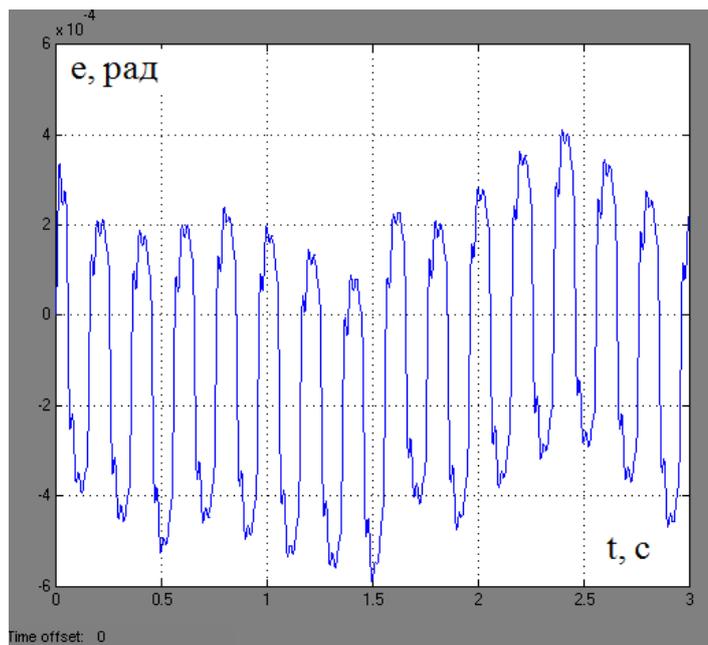


Рис.4. Ошибка при обработке бортовой качки.

На рис.4 максимальная ошибка при обработке бортовой качки не превышает  $0.6$  мрад.

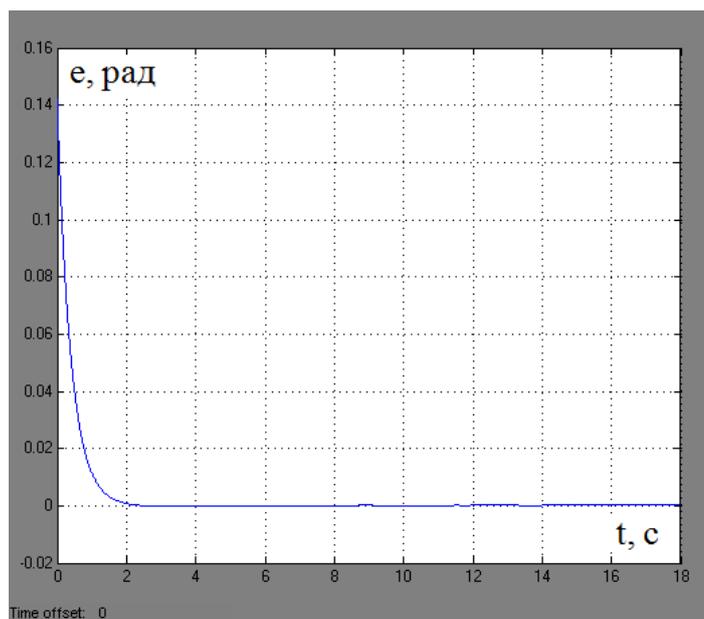


Рис.5. Ошибка при обработке типового сигнала арктангенса.

На рис.5 максимальная ошибка при наибольшей скорости изменения входного сигнала арктангенса –  $0.5$  мрад.

Таким образом, реализация ПИД-алгоритма управления позволяет получить работоспособную систему, удовлетворяющую всем поставленным требованиям. Следует заметить, что в процессе моделирования системы с ПИД-алгоритмом в схему вводится компенсирующая связь, представляющая собой скорость изменения входного сигнала, что позволяет увеличить точность обработки сигнала арктангенса.

## 2. Квазиоптимальный по быстродействию закон управления.

Квазиоптимальный по быстродействию закон для исследуемой системы с учетом влияния малой постоянной времени имеет вид:

$$U = K \cdot A \cdot \operatorname{sign}(\varphi_{\text{вх}} - \varphi + (\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) \cdot \tau + T \cdot ((\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{1}{T}(\omega - K_i \cdot I) \cdot \tau) - K \cdot A \cdot T \cdot \ln\left(\frac{(\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{\tau}{T}(\omega - K_i \cdot I) + KA}{KA}\right) \cdot \operatorname{sign}((\dot{\varphi}_{\text{вх}} - \omega) + \frac{\tau}{T}(\omega - K_i \cdot I))).$$

где  $U$  – расчетное напряжение на выходе реле,  $K$  – коэффициент передачи двигателя,  $A$  – питающее напряжение,  $\tau$  – величина упреждения,  $T$  – приведенная электромеханическая постоянная времени,  $\varphi_{\text{вх}}$  – входной сигнал,  $\varphi$  – угол поворота вала нагрузки,  $\omega$  – угловая скорость вала нагрузки,  $I$  – ток в обмотках статора двигателя.

Квазиоптимальный по быстродействию закон управления в своем исходном виде непригоден для использования в реальной системе управления. При моделировании системы с учетом характеристик БИЧЭ отработка входных сигналов сопровождается появлением низкочастотных автоколебаний по току, что является фактором, крайне негативно влияющим на динамику и точность переходных процессов. Отработка входного сигнала по угловой скорости малой амплитуды не представляется возможной, так как исследуемый режим сопровождается появлением низкочастотных колебаний угловой скорости, амплитуда которых превышает величину входного сигнала.

Корректировка закона управления возможна на основе модификации вида линии переключения путем изменения величины упреждения  $\tau$ . Графически на фазовой плоскости данная операция представляется изменением угла наклона линии переключения. Подбор подходящей величины упреждения необходимо производить таким образом, чтобы скорректированная система, моделирующая реальные характеристики БИЧЭ, удовлетворяла требованиям технического задания. Экспериментальное исследование показало, что увеличение  $\tau$  приводит к следующим результатам:

1. Затягивается время переходного процесса при отработке входных сигналов.
2. Увеличивается частота автоколебаний по току.
3. Увеличивается статическая точность отработки входных сигналов.
4. Уменьшается точность стабилизации ОУ в условиях действия качки.

Таким образом, задача корректировки закона управления сводится к выбору величины упреждения  $\tau$ , при которой обеспечивается требуемая статическая точность отработки

входных сигналов и точность стабилизации в условиях действия качки, а также достигается требуемое качество переходных процессов.

Исходя из изложенных выше рассуждений, подобрана компромиссная величина упреждения  $\tau_{mod}$ . Графики переходных процессов в системе со скорректированным законом управления приведены на рис.6-9.

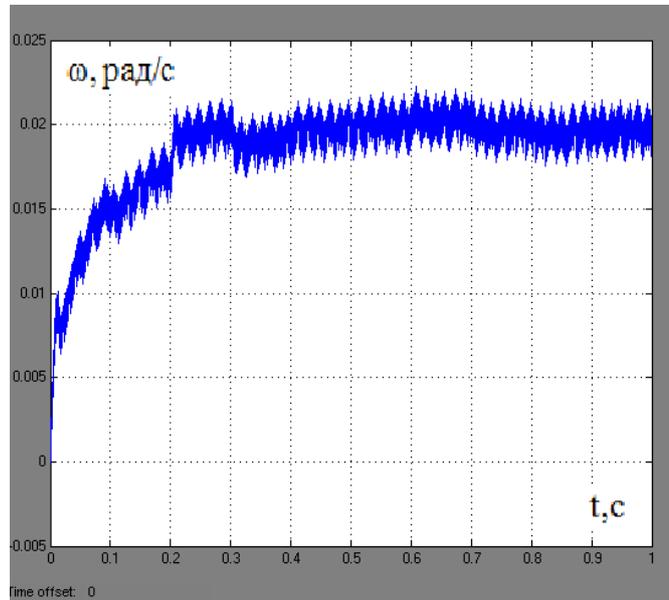


Рис.6. Обработка ступенчатого сигнала по угловой скорости с амплитудой 0.02 рад/с.

Характеристики переходного процесса на рис.6: время регулирования 0.2 сек, перерегуливание 0%.

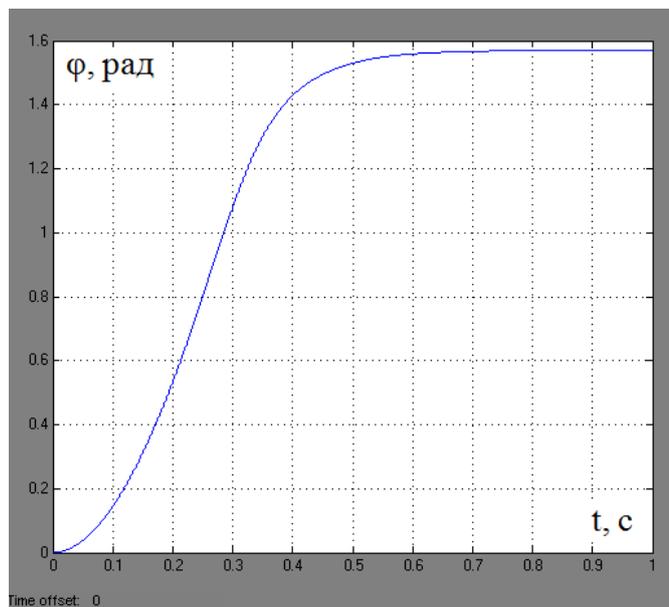


Рис.7. Обработка ступенчатого сигнала по углу с амплитудой 1.57 рад .

Характеристики переходного процесса на рис.7: время регулирования 0.9 сек, перерегуливание 0%.

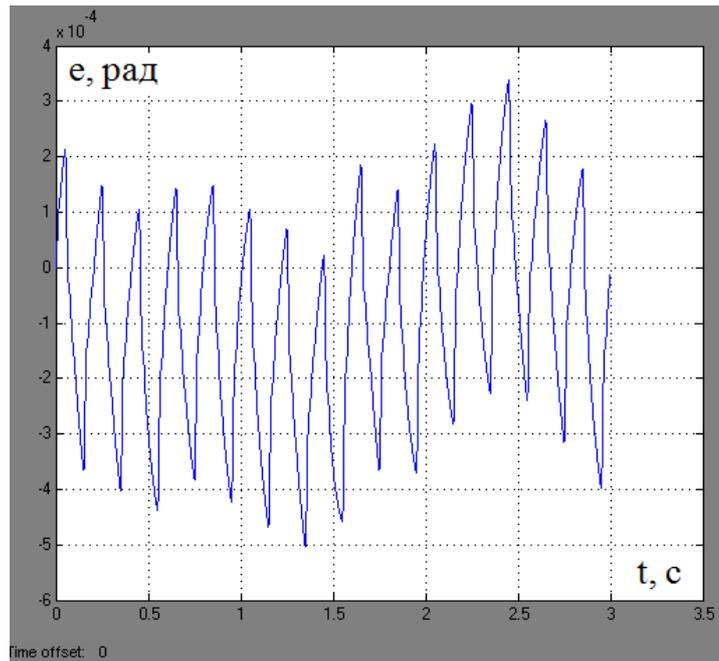


Рис.8. Ошибка при обработке бортовой качки.

На рис.8 максимальная ошибка при обработке бортовой качки не превышает 0.5 мрад.

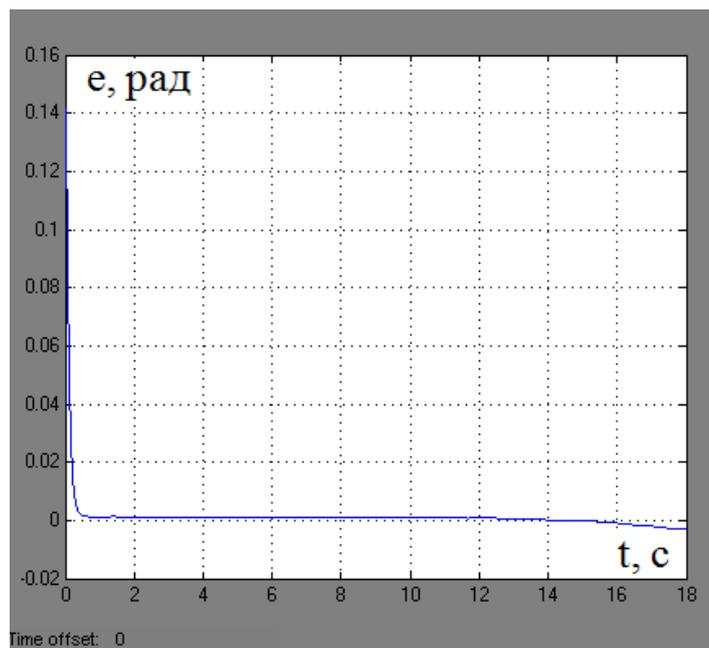


Рис.9. Ошибка при обработке типового сигнала арктангенса.

На рис.9 максимальная ошибка при наибольшей скорости изменения входного сигнала арктангенса – 3 мрад.

Таким образом, корректировка закона управления позволяет добиться приемлемых результатов во всех режимах, кроме обработки арктангенса. Последующее изменение величины упреждения не позволяет совокупно улучшить исследуемые характеристики, следовательно, в данном случае при применении указанного метода коррекции закона

управления принципиально невозможно получить систему, полностью удовлетворяющую требованиям технического задания.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о предпочтительности использования ПИД-алгоритма при построении систем управления опико-электронными модулями с использованием БИЧЭ. В процессе проектирования проводится синтез корректирующих устройств, которые позволяют реализовать систему, удовлетворяющую требованиям технического задания как при наличии допущений об идеальности датчиков, так и при учете реальных характеристик БИЧЭ. При отработке некоторых сигналов сложной формы требуется введение компенсирующей связи, позволяющей увеличить точность системы.

Квазиоптимальный по быстродействию алгоритм в исходном виде, при заданных параметрах БИЧЭ, непригоден для использования в приводах АЦНС, а корректировка закона управления превращается в сложный поиск параметров линии переключения, позволяющих обеспечить приемлемые характеристики приводов. При этом возможна ситуация, в которой принципиально невозможно совокупное выполнение всех поставленных требований, что определяет необходимость применения других алгоритмов управления.

### **Библиографический список**

1. Математические основы теории автоматического управления. В 3-х томах. Том 1 / Под. ред. Б.К. Чемоданова – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 552 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.

### **Сведения об авторах**

Горячев Олег Владимирович, заведующий кафедрой Тульского государственного университета, профессор, д.т.н.

ТулГУ, пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012;

тел.: (4872)35-38-35; e-mail: info@sau.tsu.tula.ru

Чадаев Алексей Викторович, студент Тульского государственного университета.

ТулГУ, пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012;

e-mail: info@sau.tsu.tula.ru