



УДК 621.316.722.9

К.П. Тимошенко, А.А. Юрганов

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН

К.Р. Timoshchenko, A.A. Urganov

MAIN FEATURES OF DESIGNING OF THE CONTROL SYSTEMS BY THE EXCITATION OF SYNCHRONOUS MACHINES

Во всех энергокомпаниях мира идет массовый перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу. В процесс перехода возник ряд технических проблем. Приведен обзор основных проблем, выявленных в процессе многолетней разработки и эксплуатации систем управления возбуждением синхронных машин.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; СИНХРОННАЯ МАШИНА; СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ; РЕГУЛЯТОР ПИД.

At present in all energy companies of the world there is a large scale transition of the managing and regulation facilities from the analog to the digital hardware. In the process of this transition a number of technical problems arise. The review is given of the principal problems identified in the process of the longstanding development and operation of the control systems by the excitation of synchronous machines.

CONTROL SYSTEM; SYNCHRONOUS MACHINE; EXCITATION SYSTEM; REGULATOR PID.

Актуальность проблемы

В настоящее время во всех энергокомпаниях мира идет массовый перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу. Это относится и к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных машин (генераторы электростанций и мощные двигатели). Практически все производители оснащают их цифровыми системами возбуждения.

При этом структура АРВ и алгоритм автоматического регулятора возбуждения (АРВ) со-

храняются такими же, как в аналоговых системах (рис. 1).

По существующим правилам поставки оборудования производитель представляет компании-потребителю математическое описание своей продукции [8]. До настоящего времени такое математическое описание предоставляется в виде операторных передаточных функций (transfer Functions), состоящих из стандартных звеньев вида $W(s)$, где s — оператор Лапласа.

Практика показала, что часто работа математических моделей отличается от работы

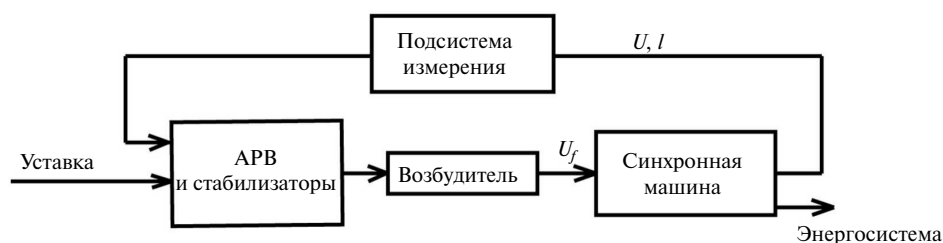


Рис. 1. Структурная схема системы управления возбуждением синхронной машины

реальных цифровых устройств [11], представленным таким образом. Поэтому в Российской Федерации разрешение на применение цифровых АРВ выдается только после испытаний головного образца на физической модели энергосистем в утвержденной типовой схеме и по единой утвержденной типовой программе [8]. Поиск возможных причин различия процессов в модели и в реальных устройствах САРВ привел к написанию данной статьи.

Цель данной работы — обобщение материала, накопленного в результате многолетнего опыта разработки систем регулирования и управления возбуждением синхронных машин. Статья — краткая выжимка основных проблем, возникающих при проектировании цифровых регуляторов возбуждения.

Анализ результатов испытаний и мер, принятых производителями для коррекции алгоритмов, позволил выявить основные причины различия свойств реальных дискретных устройств и их аналоговых моделей, принятых за основу при проектировании аппаратуры.

Требования, предъявляемые к первичной обработке и оцифровке входных аналоговых сигналов U, I и, как следствие, частоты f

Требования к обработке первичных сигналов вытекают из требований к частоте дискретизации, разрядности оцифровываемых данных и точности регулирования.

Перед преобразованием аналогового сигнала в цифровую форму необходимо обязательно осуществлять аналоговую фильтрацию с частотой среза, немного превышающей частоту дискретизации. Это требование связано с устранением алиасных частот в спектре полезного сигнала. Частота алиасного сигнала равна разности частот помехи и квантования. Происходит смещение спектра высокочастотного сигнала в низкочастотную область. На стадии цифровой обработки избавиться от такого вида помехи невозможно.

Чтобы предотвратить наложение спектров, сигнал, подаваемый на вход АЦП, должен быть пропущен через фильтр нижних частот для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Такой фильтр получил название anti-aliasing (антиалиасинговый).

Вообще, применение аналогового входного фильтра целесообразно не только по этой причине. Если в сигнале присутствуют компоненты значительно более мощные, чем полезный сигнал, и достаточно далеко отстоящие от него по частоте, то аналоговым фильтром нельзя подавить помеху достаточно эффективно. После оцифровки можно воспользоваться преимуществами цифровой обработки сигнала и построить эффективный цифровой фильтр. Такое решение позволяет сохранить динамический диапазон АЦП. Если помеха сильнее сигнала, на нее впустую будет тратиться в среднем три бита разрядности.

Характеристики системы, накладывающие ограничения на частоту дискретизации оцифровываемых данных:

быстродействие исполнительного элемента (для полного моста системы возбуждения — это $1/6$ периода синусоидального сигнала. То есть можно выдавать кванты воздействия не чаще, чем через $1/6$ период сигнала, подаваемого на тиристорный мост (рис. 2));

точность измерений, зависящая от формы сигнала. Если не применять специальные методы синхронизации реальной синусоиды и выбор точек измерений, для подсчета действующего значения сигнала с точностью $0,1\%$ требуется сделать 100 измерений на период. Частота выборки аналогово-цифрового преобразователя всегда не кратна частоте оцифровываемого гармонического сигнала, поскольку частота сигнала меняется во времени (при работе в сети — обычно не более $0,3$ Гц). Текущая ошибка измерения за период не будет превышать величину $\sim 0,1\%$, накопленную за один период квантования. Для исключения эффекта наложения спектров сигналов можно компенсировать ошибку, интерполировав остаток периода гармонического сигнала;

точность регулирования (влияет косвенно);
качество работы дифференциальных звеньев. Эти звенья накладывают жесткие требования к гладкости входного сигнала, поэтому при необходимости сигнал фильтруют, сглаживают.

Для повышения разрядности АЦП можно использовать передискретизацию.

Как правило, из соображений экономии вычислительной мощности сигналы оцифровываются с минимально необходимой частотой дискретизации, при этом шум квантования — «белый»,

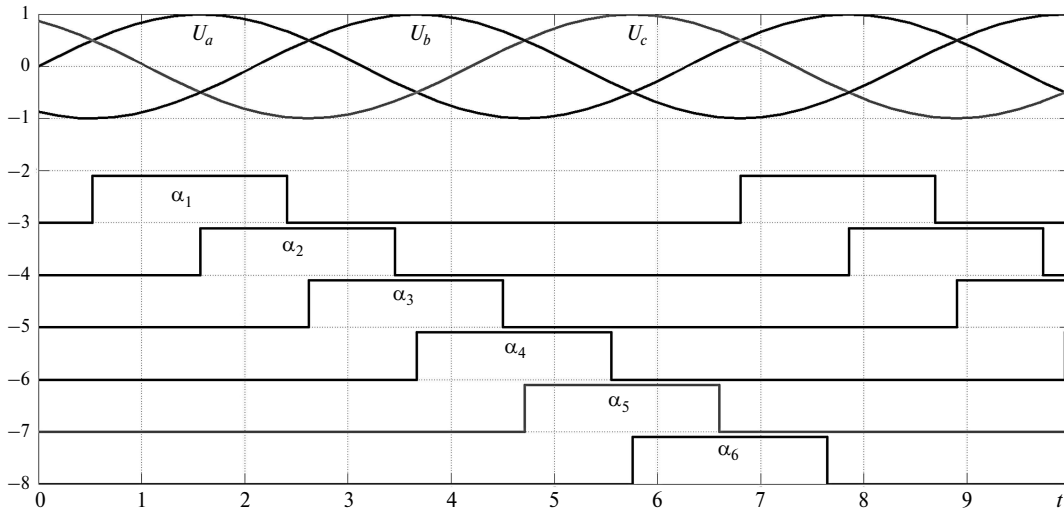


Рис. 2. Диаграмма трехфазного напряжения и углов зажигания тиристоров

т. е. его спектральная плотность мощности равномерно распределена во всей полосе. Если же оцифровать сигнал с гораздо большей частотой дискретизации, чем требуется по теореме Котельникова — Шеннона, а затем подвергнуть цифровой фильтрации для подавления спектра вне частотной полосы исходного сигнала, то отношение «сигнал/шум» будет лучше, чем при использовании всей полосы. Таким методом можно достичь эффективного разрешения большего, чем разрядность АЦП.

Передискретизация также может быть применена для смягчения требований к крутизне перехода от полосы пропускания к полосе подавления антиалиасного фильтра. Для этого сигнал оцифровывают, например, с вдвое большей частотой, затем производят цифровую фильтрацию, подавляя частотные компоненты вне полосы исходного сигнала, и, наконец, понижают частоту дискретизации путем децимации.

Характеристики системы, накладывающие ограничения на разрядность оцифровываемых данных:

точность измерений, или точность получения исходных значений для вычислений. Необходимо учитывать шум АЦП, который обычно составляет 1–2 разряда. Точность 0,1 % обеспечивается при 10 разрядах. С учетом двух «шумящих» разрядов без специальных мер подавления шума требуется 12 разрядов;

качество работы дифференциальных звеньев. Эти звенья накладывают жесткие требования к гладкости входного сигнала, поэтому

при необходимости сигнал фильтруют, сглаживают.

Требования, предъявляемые к измерителю частоты сигнала. Для системного стабилизатора внешнего движения в отечественных АРВ используется сигнал текущей частоты напряжения синхронной машины. Диапазон работы измерителя частоты составляет 20–100 Гц. Рабочий диапазон системного стабилизатора внешнего движения 0,01–5 Гц. Измерить 100 Гц с точностью 0,01 Гц возможно 14-тиразрядным счетчиком. Сделать аппаратный измеритель частоты с такой точностью — крайне затруднительно. Поэтому предпочтительно восстанавливать программно зону перехода сигнала через ноль и получать значение частоты как величину, обратную периоду напряжения на зажимах машины.

Преобразование передаточных функций в дискретную форму

Математические методы перехода от непрерывной передаточной функции к дискретной дают точные результаты. Здесь можно выделить две сложности. Обе они определяются особенностями программной реализации передаточных функций, заданных в операторной форме.

Первая особенность — это *разрядная сетка процессора*.

В процессорах с фиксированной запятой и длинной разрядной сетки 8, 16, 32 бит всегда необходимо следить за атомарностью операций и переполнением разрядной сетки. Последствия совершенно непредсказуемы. Атомарность опе-

раций в процессорах с разрядностью меньшей, чем разрядность, над которой производится операции, представляет собой огромную проблему.

Для процессоров с фиксированной запятой сложно производить Z -преобразование с необходимой точностью, поскольку в случаях, когда разность частот квантования и рабочих большая, коэффициенты передаточной функции оказываются близки друг к другу. И, соответственно, требуется бóльшая разрядность процессора.

Проблема решается применением математики с плавающей запятой. Но эмуляция плавающей запятой в процессоре с фиксированной запятой, как правило, затруднительна, поскольку на одну операцию эмуляции может уходить несколько десятков тактов. Попросту может не хватить производительности процессора.

В процессорах с плавающей запятой вышеуказанные проблемы отсутствуют.

Особенности реализации различных звеньев регулятора

В звеньях, содержащих интегрирующие цепи, присутствие эффекта «интегрального насыщения» требует особого внимания при реализации регуляторов в виде изделий. Выходное воздействие ограничено физической величиной — углом управления тиристоров (рис. 3 иллюстрирует результат этого эффекта).

График иллюстрирует поведение регулятора с интегральным звеном и при ограничении выходного воздействия.

Самым широко распространенным способом борьбы с этим эффектом можно признать метод условного запрета интегрирования. Суть его в том, что при достижении ограничения выходного воздействия накопление интеграла прекращается и он остается неизменным пока управляющее воздействие не выйдет из насыщения. При этом работают звенья, не содержащие интегрирующих элементов. Можно избежать этого эффекта, применив вместо выделенного интегрирующего звена звено с передаточной функцией

$$W = K \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2}.$$

Это звено также позволит ограничить сверхнизкочастотные колебания электрических сетей.

Звенья, содержащие дифференцирующие элементы. Цифровым дифференциатором называют линейную дискретную систему, обеспечивающую вычисление отсчетов производной сигнала по отсчетам самого сигнала в рабочей полосе. Идеальный цифровой дифференциатор имеет в рабочей полосе частот характеристику

$$H(e^{j\omega}) = jk\omega e^{-j\frac{\omega R}{2}} = k\omega e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\omega R}{2}\right)} = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

В дифференцирующем звене с ростом частоты входного сигнала растет амплитуда сигнала на выходе. Дифференцирующее звено усиливает высокочастотные помехи, особенно это заметно в случаях коммутационных перенапряжений и высокочастотных шумов первичных преобразователей.

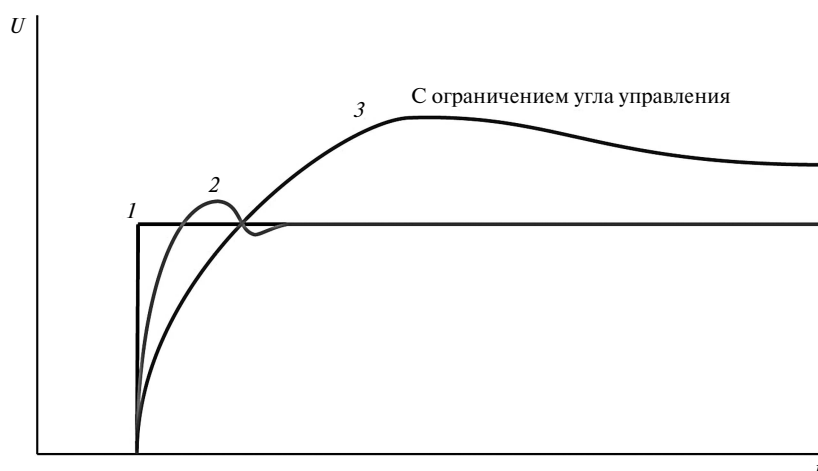


Рис. 3. График, иллюстрирующий перерегулирование при ограничении управляющего воздействия I (ступенчатое): реакции на входное воздействие без ограничения (2) и с ограничением (3) управляющей величины

Если полезный сигнал лежит ниже, чем сигнал помех, то мы можем смело отфильтровать высокочастотный сигнал. В системах возбуждения работа регулятора лежит в области сверхнизких частот (0,01–5 Гц) поэтому частоту выше 5 Гц можно отфильтровать. АЧХ регулятора имеет рабочий диапазон до 5 Гц.

Для более эффективного подавления высокочастотной помехи можно использовать фильтры более высокого порядка.

С помощью математического пакета FDA-Tools программы MathLab можно синтезировать цифровой дифференциатор на основе КИХ фильтра с заданными показателями качества.

Селектор каналов регулирования

В регуляторах возникают режимы, когда их параметры могут изменяться скачком (изменение параметров регулятора; смена переменной слежения, отключение — включение звеньев регулятора). Все эти манипуляции без дополнительных мер защиты приводят к нежелательным выбросам управляющего сигнала. Встает задача безударного перехода между режимами регулятора при изменении его параметров. Основную проблему вносят интегральные звенья.

В регуляторах применяют аппроксимацию: конечной суммой для интеграла и конечной разностью для производной. В первом случае умножают на коэффициент накопленное значение интеграла, а во втором накапливают разности, умноженные на постоянную времени. Для чистого интеграла обычно используют вычисление по формуле с правыми разностями:

$$I_{i+1} = I_i + \frac{\Delta t}{T_i} e_{i+1}.$$

Используем значение ошибки в момент вычисления интеграла.

Для предотвращения толчка при изменении времени интегрирования необходимо, чтобы в программной реализации регулятора постоянная времени входила под интеграл, а не перед ним. Отключение интегрального звена должно производиться прекращением его накопления, включение — продолжением работы с остановленного места. При изменении входной переменной необходимо менять закон регулирования. Нужно аккуратно выводить из работы и вводить обратно звенья регулятора.

Применение программно-аппаратных модулей для выявления переменных состояния объекта (отклонения частоты и ее первой производной по времени)

Существуют два основных метода преобразования передаточной функции линейной системы из непрерывной $W_{a(s)}$ в дискретную $W_{d(z)}$ функцию.

Первый метод сохраняет временные характеристики системы (инвариантность импульсных, переходных характеристик или реакций на более сложный входной сигнал). Этот метод гарантирует хорошее совпадение соответствующих временных характеристик для аналоговых и дискретных форм (примером могут служить экстраполяторы нулевого или первого порядка «ZOH», «FOH»).

Второй метод обеспечивает хорошее совпадение частотных характеристик, но не сохраняет точность временных (пример — билинейная аппроксимация Тастина и ее модификации).

С точки зрения обеспечения максимальной устойчивости и наилучшего качества регулирования целесообразно использовать метод инвариантности частотных характеристик. Здесь можно применять преобразование Эйлера и билинейное преобразование (Tustin's method transformation). С точки зрения сохранения частотных характеристик (особенно фазовых) метод билинейного преобразования предпочтителен [12].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

частота дискретизации должна быть много больше, чем рабочая частота — это позволит избежать проблем при дальнейшей работе;

применение антиалиасного фильтра обязательно;

шум АЦП необходимо компенсировать; эффект интегрального насыщения является источником проблем при работе регуляторов;

сигнал перед дифференциатором необходимо сглаживать (например, с помощью фильтров высоких частот);

неправильное местоположение постоянных времени интегрирующих звеньев приводит к выбросам выхода регулятора при изменении величины самих постоянных времени;

селектор, управляющий вводом-выводом звеньев регулятора, требует особого внимания при программировании;

весьма желательно использовать микропроцессор той разрядности, в которой производятся математические вычисления;

при преобразовании передаточной функции линейной системы из непрерывной $W_{a(s)}$ в дискретную $W_{d(z)}$ функцию необходимо внимательно выбирать метод преобразования.

Учитывая сказанное, сформулируем требования к процессорной части регуляторов СВ:

в качестве процессора необходимо использовать процессор с плавающей запятой;

разрядность оцифровки входных значений должна быть не ниже 10 разрядов, т. е. разрядность АЦП — не ниже 12 bit;

необходима частота оцифровки не менее 20 кГц (оптимально — 40 кГц). Требование диктуется точностью вычисления параметров входного сигнала (при частоте 100 Гц — 100 точек на период);

требуется разрядность счетчика частоты не меньше 16 бит (желательно — 32 бит), что связано с точностью измерения частоты в диапазоне до 100 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович М.А. [и др.] Автоматика энергосистем. 3-е изд-е. -М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
2. Бессекерский В.А. [и др.] Микропроцессорные системы автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1988. 365 с.
3. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. Киев.: Техника, 1990. 280 с.
4. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74; 2007. № 1. С. 78–88.
5. Крутько П.Д. [и др.] Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1988. 306 с.
6. Подчукаев В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы). М.: Физматлит, 2004. 392 с.
7. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004. 400 с.
8. Стандарт ОАО «СО ЕЭС». Требования к систе-

мам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. (СТО 59012820.29.160.20.001–2012). Утвержден и введен в действие 03.04.12 // http://www.so-cdu.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf

9. Трохин В.М. Цифроаналоговые системы автоматического управления. Киев: Техника, 1979. 160 с.

10. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. // *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006. 460 p.

11. Burmistrov A., Popov E., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex power system and suggestion of estimation technique and criteriaas an addition to the IEC standard // *CIGRE*. 2012. C2–103

12. Way P. Digital Representations of Analog Systems for Control System Applications // http://m.eet.com/media/1060220/Digital_Representation_of_Analog_Systems.pdf

REFERENCES

1. Berkovich M.A. [i dr.]. Avtomatika energosistem. 3-ye izd-ye. M.: Energoatomizdat, 1991. 240 s. (rus.)
2. Bessekerskiy V.A. i dr. Mikroprotsessornyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. L.: Mashinostroyeniye, 1988, 365 s. (rus.)
3. Gostev V.I. Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami: spravochnik. K.: Tekhnika, 1990, 280 s. (rus.)
4. Denisenko V.V. PIDregulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*. 2006. № 4. S. 66–74; 2007. № 1. S. 78–88. (rus.)
5. Krutko P.D. [i dr.]. Algoritmy i programmy proyektirovaniya avtomaticheskikh sistem. M.: Radio i svyaz, 1988, 306 s. (rus.)
6. Podchukayev V.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (analiticheskiye metody). — M.: Fizmatlit, 2004. — 392 s. (rus.)
7. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. — M.: Izdatelstvo MEI, 2004. — 400 s. (rus.)
8. Standart ОАО «SO EES». Trebovaniya k sistemam vozbuzhdeniya i avtomaticheskim regulyatoram vozbuzh-

deniya silnogo deystviya sinkhronnykh generatorov. http://www.so-cdu.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf (СТО 59012820.29.160.20.001–2012) utverzhdn i vveden v deystviye 03.04.12

9. Trokhin V.M. Tsifroanalogovyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. K.: Tekhnika, 1979, 160 s. (rus.)

10. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006, 460 p.

11. Burmistrov A., Popov Ye., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex power system and suggestion of estimation technique and criteriaas an addition to the IEC standard. *CIGRE*, 2012, C2–103.

12. Way Peter, Digital Representations of Analog Systems for Control System Applications. http://m.eet.com/media/1060220/Digital_Representation_of_Analog_Systems.pdf

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИМОЩЕНКО Константин Павлович — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; Россия; e-mail: konst.tim@gmail.com.

ЮРГАНОВ Алексей Анатольевич — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный»; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; Россия; e-mail: aarganov@gmail.com.

TIMOSHCHENKO Konstantin P. — National mineral resources university (University of mines); 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya d.2; Russia; e-mail: konst.tim@gmail.com.

URGANOV Alexey A. — National mineral resources university (University of mines); 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya d.2; Russia; e-mail: aarganov@gmail.com.