

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫСОКОТОЧНОГО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Сизов А.Н.¹, Чубаров Ф.Л.¹, Гусев И.В.¹

¹КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга 248000, Россия, ул. Баженова 2, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru

В статье затронуты вопросы, связанные с проектированием одного из наиболее ответственных узлов в составе современных систем регулирования паровых турбин. Статья опирается на ранее опубликованные по той же теме материалы и достаточно подробно описывает построенную математическую модель «электромеханический привод + отсечной золотник», притом, что гидравлическая часть системы ограничивается лишь отсечным золотником (присоединённой массой к выходному штоку ЭМП). В работе приводится построение математической модели СПОЗ в ортогональной синхронной системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована по магнитной оси ротора. Делается вывод о том, что использование математической модели в данной системе координат значительно упрощается и синтез управления для СПОЗ целесообразно проводить в этой системе, а моделирование, ШИМ-регулирование напряжения на обмотках статора - в системе a-b-c.

Ключевые слова: следящий привод, отсечной золотник, паровая турбина, система регулирования, регулирующий клапан.

THE DEVELOPMENT OF CONTINUOUS PRECISION HIGH-SPEED ELECTROMECHANICAL DRIVE MODEL

Sizov A.N.¹, Chubarov F.L.¹, Gusev I.V.¹

¹KB BMSTU, Kaluga 248000, Russia, Bazhenov 2 st, e-mail: mail@bmstu-kaluga.ru

The article touched upon issues related to the design of one of the most important units in the composition of modern control systems of steam turbines. The article is based on previously published on the same subject material and enough detail the construction of a mathematical model of the "cut-off electromechanical actuator + valve", despite the fact that the hydraulic part of the system is limited to a shut-off spool (the attached weight to the output shaft EMF). The work is to construct a mathematical model SPOZ in synchronous orthogonal coordinate system (d, q) , d axis is oriented along the magnetic axis of the rotor. It is concluded that the use of mathematical models in this coordinate system is greatly simplified and the synthesis control SPOZ expediently carried out in this system and simulation, the PWM control voltage to the stator windings – in the a-b-c system.

Keywords: servo drive, shut-off valve, steam turbine control system, a control valve.

Следящий привод отсечного золотника (СПОЗ) является типовым элементом блока регулирования современной системы автоматического регулирования паровой турбины (САР ПТ). Он предназначен для преобразования электрического сигнала управления от электронной управляющей части (ЭУЧ) САР ПТ в перемещение сервомотора (СМ), перемещающего соответствующий паровпускной регулирующий клапан (РК). Конкретный пример такого объекта и системы регулирования приведен в работе [7].

Целью исследования является разработка новой модели высокоточного быстродействующего следящего электромеханического привода.

Материал и методы исследования. Золотник отсечной (ОЗ), являясь элементом гидравлики, предназначен для изменения положения сервомоторов (гидроцилиндров) привода РК по сигналам управления от ЭУЧ системы регулирования посредством ЭМП, а также для форсированного перемещения СМ в сторону закрытия РК при срабатывании

аварийной защиты ПТ. Не рассматривая здесь вопросы выбора оптимальной структуры системы регулирования, частично отражённые ранее в [7], уделим более пристальное внимание электромеханическому варианту исполнения СПОЗ, обладающему рядом эксплуатационных достоинств по сравнению с аналогами [8].

Такой СПОЗ функционально включает в себя исполнительный элемент – синхронный электродвигатель переменного тока (СЭ ПТ); ролико-винтовую передачу (РВП); преобразователь частоты (ПЧ), реализующий алгоритм широтно-импульсной модуляции (ШИМ)/векторного управления СЭ ПТ; датчик положения ОЗ (обратная связь).

Рассмотрим приближённую математическую модель электромеханического преобразователя ОЗ. Функциональная схема следящего привода ОЗ представлена на рис. 1.

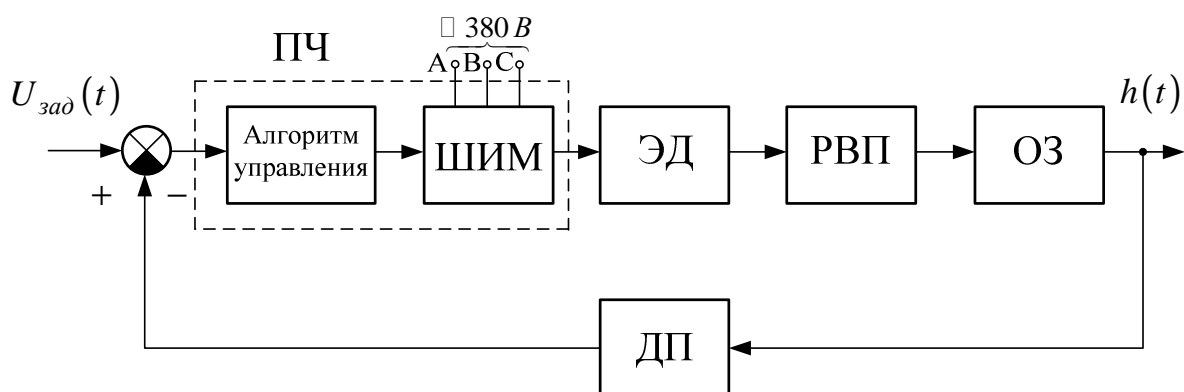


Рис. 1. Функциональная схема следящего привода отсечного золотника со следующими условными

обозначениями: ШИМ – модуль реализующий алгоритм широтно-импульсной модуляции; ЭД – электрический двигатель переменного тока; РВП – ролико-винтовая передача; ОЗ – отсечной золотник; ДП – датчик положения ОЗ; ПЧ – преобразователь частоты

Составим математическую модель СПОЗ согласно функциональной схеме. При построении математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами приняты следующие допущения:

- отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Уравнения синхронной машины с постоянными магнитами также рассмотрим в ортогональной синхронной системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована по магнитной оси ротора (рис. 2).

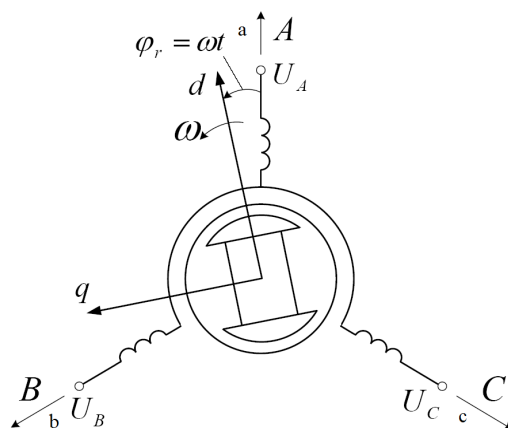


Рис. 2. Схематическое изображение синхронного двигателя с постоянными магнитами

В этом случае уравнения принимают следующий вид (модель Парка – Горева) [5]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \\ J_{\text{дв}} \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{\text{дв}}(t) - M_{\text{с}}(t), \\ \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_d(t) + p\omega(t)i_q(t) + \frac{1}{L}u_d(t), \\ \frac{di_q(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_q(t) - p\omega(t)i_d(t) - \frac{k_m}{L}\omega(t) + \frac{1}{L}u_q(t), \end{cases} \quad (0.1)$$

где $I_d(t), I_q(t), U_d(t), U_q(t)$ – токи и напряжения статора по осям d и q ; электромагнитный момент на валу ЭД ПТ; $M_{\text{дв}}(t)$ – электромагнитный момент на валу ЭД ПТ; $M_{\text{с}}(t)$ – статический момент нагрузки; $\omega(t)$ – угловая частота вращения ротора, рад/с; J – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя; R и L – сопротивление и индуктивность статорных обмоток (для случая неявнополюсной конструкции ротора двигателя).

Рассмотрим более подробно второе уравнение системы (0.1), уравнение движения привода

$$J_{\text{дв}} \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{\text{дв}}(t) - M_{\text{с}}(t) = c_m i_q(t) - M_{\text{с}}(t), \quad (0.2)$$

где c_m – коэффициент момента электродвигателя. Для преобразования вращения ротора электродвигателя в поступательное перемещение отсечного золотника применена РВП. Для получения более полной модели СПОЗ необходимо модель (0.1) дополнить математической моделью РВП. Уравнение движения привода (0.2) с учетом РВП:

$$M_{\text{ВЫХ}}(t) = c_m i_q(t) - J_{\text{дв}} \frac{d}{dt} \omega(t) - M_{\text{тр}} \text{sign}[\omega(t)], \quad (0.3)$$

$\dot{\omega}(t)$ – угловое ускорение электродвигателя; $M_{\text{тр}}$ – суммарный момент трения в двигателе и подшипниках ЭМП; $M_{\text{ВЫХ}}(t)$ – момент на валу ЭД ПТ.

Сила, приложенная со стороны электродвигателя, к отсечному золотнику [3]:

$$F(t) = \frac{2\pi}{H} \eta M_{\text{ВЫХ}}(t), \quad (0.4)$$

H – величина шага РВП; η – коэффициент полезного действия РВП.

Величина скорости перемещения отсечного золотника определяется из выражения [3]:

$$m \frac{d^2}{dt^2} h_{\text{зол}}(t) + K_{\text{вт}} \frac{d}{dt} h_{\text{зол}}(t) = F(t), \quad (0.5)$$

m – суммарная масса отсечного золотника и винта, жестко с ним соединенного; $K_{\text{вт}}$ – коэффициент вязкого трения в отсечном золотнике; $\ddot{h}_{\text{зол}}(t)$ – ускорение отсечного золотника; $\dot{h}_{\text{зол}}(t)$ – скорость отсечного золотника.

На вход системы электромеханического следящего привода поступает сигнал $u_{\text{зад}}(t)$, пропорциональный задаваемому значению отклонения отсечного золотника. Управление происходит непрерывным токовым сигналом в диапазоне $5 \div 20$ [мА] и входное сопротивление, установленное на входе АЦП преобразователя частоты, имеет значение 200 [Ом], что эквивалентно изменению сигнала $u_{\text{зад}}(t)$ в диапазоне $1 \div 4$ [В].

Ошибка обработки сигнала

$$\Delta u(t) = u_{\text{зад}}(t) - u_{\text{зол}}(t) \quad (0.6)$$

где $u_{\text{зол}}$ – сигнал с выхода датчика линейного перемещения золотника []:

$$u_{\text{зол}}(t) = K_{\text{дп}} h_{\text{зол}}(t), \quad (0.7)$$

$K_{\text{дп}}$ – коэффициент датчика перемещения отсечного золотника.

Зависимость угловой скорости вала ЭД ПТ от величины перемещения вала РВП, определяется выражением:

$$\omega(t) = \frac{2\pi}{H} \frac{d}{dt} h_{\text{зол}}(t). \quad (0.8)$$

Тогда математическая модель СПОЗ в системе координат $a - b - c$ примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \\ M_{\text{ВЫХ}} = -c_m \frac{\sqrt{6}}{3} \sin(p\varphi) i_a + c_m \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(p\varphi) + \frac{\sqrt{6}}{6} \sin(p\varphi) \right] i_b + \\ + c_m \left[\frac{\sqrt{6}}{6} \sin(p\varphi) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(p\varphi) \right] i_c - J_{\text{ДВ}} \frac{d}{dt} \omega - M_{\text{ТР}} \text{sign}[\omega], \end{cases} \quad (0.9)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \frac{1}{L} \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{3} c_m \omega \sin(p\varphi) \\ -\left(\frac{\sqrt{6}}{6} \sin(p\varphi) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(p\varphi) \right) c_m \omega \\ \left(-\frac{\sqrt{6}}{6} \sin(p\varphi) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(p\varphi) \right) c_m \omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} + \frac{R}{L} \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_T} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{1}{L} \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_H} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \mathbf{A} + \frac{R}{L} \mathbf{A}_T \mathbf{I}^T + \frac{1}{L} \mathbf{A}_H \mathbf{U}^T, \end{aligned} \quad (0.10)$$

где \mathbf{A}_T и \mathbf{A}_H матрицы разложения, справедливы для трехфазных симметричных машин переменного тока (используются в ШИМ); $\mathbf{I} = [i_a \ i_b \ i_c]$; $\mathbf{U} = [u_a \ u_b \ u_c]$.

Для управления СПОЗ, последний комплектуется преобразователем частоты (ПЧ) [7], модель и алгоритм работы которого подлежат отдельному рассмотрению.

Результаты исследования. Таким образом, результирующее управление, поступающее на ПЧ ЭД ПТ имеет вид:

$$u_y(t) = u_{\text{зад}}(t) - u_{\text{зол}}(t) + u_{\text{ком}}(t), \quad (0.11)$$

где $u_{\text{ком}}(t)$ – сигнал, обеспечивающий уменьшение ошибки от воздействия осевой нагрузки на отсечной золотник, $u_{\text{ком}} = 0$ при $-u_{\text{зол1}} \leq u_{\text{зол}} \leq u_{\text{зол1}}$; $u_{\text{ком}} = K_{\text{от}}(u_{\text{зол}} - u_{\text{зол1}})$ при $-u_{\text{зол1}} > u_{\text{зол}} > u_{\text{зол1}}$; $u_{\text{зол1}}$ – сигнал, пропорциональный значению отклонения отсечного

золотника, до которого значение $u_{\text{КОМ}}$ равно нулю ($u_{\text{ЗОЛ1}} = 2[\text{В}]$ – гидравлический ноль);

$K_{\text{от}}$ – коэффициент компенсационного сигнала.

Структурная схема электромеханического СПОЗ представлена на рис. 3.

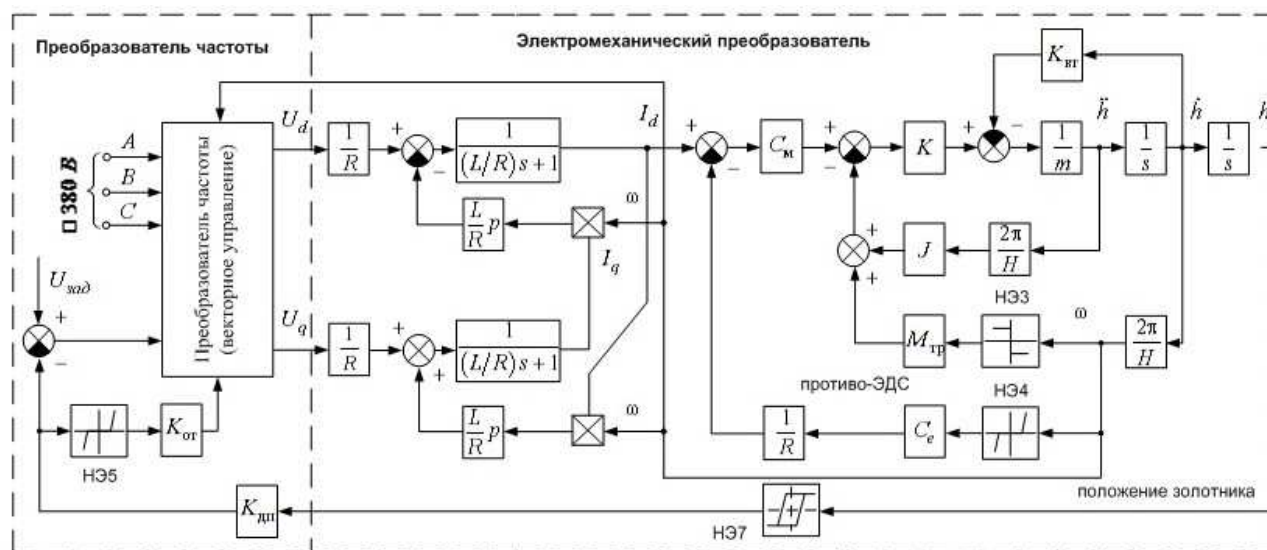


Рис. 3. Структурная схема следящего привода отсечного золотника

Выводы. Видно, что обе математические модели (0.1) и (0.10) являются нелинейными, но математическая модель СПОЗ в системе координат $d - q$ значительно проще. Поэтому синтез управления для СПОЗ можно проводить в этой системе, а моделирование, ШИМ-регулирование напряжения на обмотках статора в системе $a - b - c$.

Техническая документация и результаты предварительных испытаний [2] одного из существующих образцов СПОЗ (производства ЗАО «Диаконт», г. С.-Петербург) позволили выполнить количественную оценку параметров его математической модели [2], основными из которых являются параметры электродвигателя (Таблица 1). Нелинейные характеристики реального оборудования, входящего в такой контур регулирования [8], могут быть описаны типовыми элементами из Таблицы 2. Следующим этапом исследования предполагается верификация разработанной модели СПОЗ путём сравнения переходных процессов по перемещению штока в модели и реальном опытном образце, а также исследование влияния зоны нечувствительности в связке «ОЗ-СМ» на устойчивость гидравлического контура в сравнении с имеющимися эксплуатационными данными [9].

Таблица 1

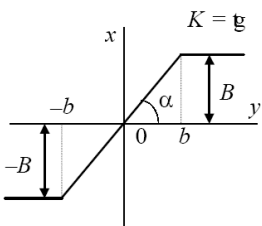
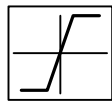
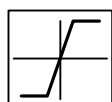
Параметры электродвигателя

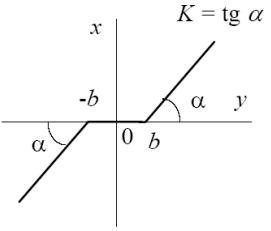
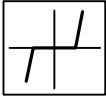
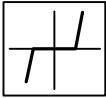
Коэффициент момента электродвигателя	$C_m = 1,34 \text{ Нм} / \text{А}$
Шаг РВП	$H = 20 \text{ мм}$
Коэффициент полезного действия РВП	$\eta = 0,75$

Суммарный момент инерции, приведенный к ротору серводвигателя	$J = 0,0044 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Суммарный момент трения в приведенный к валу двигателя	$M_{тр} = 3 \text{ Нм}$
Суммарная масса отсечного золотника и винта	$m = 9 \text{ кг}$
Коэффициент датчика перемещения ОЗ	$K_{дп} = 190,5 \text{ В / м}$
Коэффициент вязкого трения в отсечном золотнике	$K_{вт} = 1100 \text{ Нм}$
Механическая постоянная времени серводвигателя, мс	1,96
Электрическая постоянная времени серводвигателя, мс	7,36

Таблица 2

Типовые элементы нелинейных характеристик оборудования контура регулирования

Нелинейный элемент (аналитическая форма записи)	Обозначение на структурной схеме (рис. 3)	Значение параметров
<p>Нелинейный элемент 1</p> <p>Линейная характеристика с насыщением</p>  $x = \begin{cases} B & \text{при } y > b; \\ Ky & \text{при } y \leq b; \\ -B & \text{при } y < -b \end{cases}$	 <p>НЭ1</p>	$\begin{cases} B = 10, \\ -B = -10, \\ K = \text{tg}\alpha = 1. \end{cases}$
<p>Нелинейный элемент 2</p> <p>Тоже самое (см. НЭ1)</p>	 <p>НЭ2</p>	$\begin{cases} B = 34,4, \\ -B = -34,4, \\ K = \text{tg}\alpha = 1. \end{cases}$

Нелинейный элемент 4	<p>Линейная характеристика с зоной нечувствительности</p>  $x = \begin{cases} K(y-b) & \text{при } y > b; \\ 0 & \text{при } y \leq b; \\ K(y+b) & \text{при } y < -b \end{cases}$	<p>НЭ4</p> 	$\begin{cases} b = 275,4, \\ -b = -275,4, \\ K = \operatorname{tg} \alpha = 1. \end{cases}$
Нелинейный элемент 5	<p>То же самое (см. НЭ4)</p>	<p>НЭ5</p> 	$\begin{cases} b = 2,057, \\ -b = 1,998, \\ K = \operatorname{tg} \alpha = 1. \end{cases}$ <p>Примечание: смещение в положительном направлении оси абсцисс.</p>

Список литературы

1. Алексеева Т.В., Бабанская В.Д., Башта Т.М. и др. Техническая диагностика гидравлических приводов. – М.: Машиностроение. 1989. – 264 с.: ил.
2. Исходные данные для моделирования электромеханического следящего привода отсечного золотника, рег. № А23/30-632, ЗАО «Диаконт», 2011.
3. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты: Монография. – СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 300с.
4. Направления развития турбиностроения на ОАО "Калужский турбинный завод". Сборник статей, посвящённый 60-летию ОАО "КТЗ". Под общ. ред. Максимова Ю.А. – Калуга: типография ОАО "КТЗ", 2006. – 415 с.: ил.
5. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. 2-е изд. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.: ил. (Серия Механика в техническом университете; Т. 7)
6. Программа и методика предварительных испытаний ЭМП, рег. № А17/30-632, ЗАО «Диаконт», 2011.
7. Сизов А.Н., Кириллов А.А., Кушбасов А.Н. Концепция разработки оборудования для блочной АТГУ и ПТУ. Анализ существующих схем регулирования и предложения по их модернизации. Материалы X молодёжной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2012». – СПб.: Изд-во ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2012.

8. Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Рогоза А.А. Анализ некоторых результатов стендовых испытаний и проработка методики моделирования ПТУ ПЭБ АТЭС ММ. Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. – 2011. - №1. – С. 27-37.
9. Сизов А.Н., Мусатов Е.А., Чубаров Ф.Л., Гусев И.В. Применение высокоточных быстродействующих следящих электромеханических приводов в электрогидравлических системах регулирования частоты вращения паровых турбин. Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции 30 ноября 2014 г.: в 6 ч. / Под общ. ред. М.Г. Петровой. – Белгород : ИП Петрова М.Г., 2014. – Часть III. – С. 133-139.

Рецензенты:

Панаиотти С.С., д.т.н., профессор, преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга;
Шаталов В.К., д.т.н., профессор, зав. кафедрой К5 – КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
«Технологии обработки материалов», г. Калуга.