

УДК 621.039.533; 621.81-25.001.4

И.В. Друмов

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ РОТОРА  
ТУРБОМАШИНЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен расчет микропроцессорной системы управления положением ротора макета турбомашин ядерной энергетической установки. Найден оптимальный вариант структуры системы, обеспечивающий возможность управления положением ротором по заданным алгоритмам с достаточным быстродействием. Описанный метод может применяться для расчета микропроцессорных систем управления, предназначенных для регулирования.

*Ключевые слова:* микропроцессор, контроллер, система управления, ротор, турбомашин, ядерная энергетическая установка.

**1. Постановка задачи**

Для изучения принципиальных вопросов динамики ротора турбомашин ядерной энергетической установки был создан макет турбомашин [1], частично моделирующий условия эксплуатации натурной турбомашин. Микропроцессорные контроллеры являются основной логической частью системы управления положением ротора турбомашин ядерной энергетической установки [1, 2, 3]. Их основной задачей является обеспечение стабилизации ротора в центральном положении в соответствии с заданными алгоритмами и законами управления. Для выполнения этих функций контроллеры должны обладать достаточным быстродействием, возможностями по вводу сигналов от датчиков (положения ротора, частоты вращения) и выводу сигналов управления на исполнительные устройства (обмотки электромагнитов). Эти характеристики являются определяющими для структуры системы, построенной на базе микропроцессорных контроллеров. Таким образом, задача выбора структуры и состава контроллеров сводится к последовательному решению следующих задач:

- определение состава функций, возлагаемых на контроллеры;
- расчет быстродействия различных вариантов построения системы;
- выбор оптимальной структуры и состава компонентов.

Далее представлено последовательное решение этих задач.

**2. Анализ функциональной нагрузки**

Управление положением ротора путем формирования сигналов управления токами в обмотках электромагнитов в режиме реального времени производится по сигналам, получаемым от преобразователей датчиков осевого и радиального смещения, углового положения и частоты вращения ротора. Алгоритмы и законы управления положением ротора реализуются в программном обеспечении контроллера, устанавливаемом в его дисковую память и функционирующем в его оперативной памяти. Сформированные сигналы управления подаются во входные цепи управления регуляторов тока в обмотках электромагнитов.

Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций [2]:

- аналого-цифровое преобразование электрических сигналов, получаемых от преобразователей датчиков осевого и радиального смещения, углового положения и частоты вращения ротора в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В;

- масштабирование принятых значений сигналов в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов (датчик – преобразователь датчика);
- регулирование положения ротора по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону;
- формирование вектора виртуальных сил;
- формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов;
- цифро-аналоговое преобразование сигналов управления для подачи во входные цепи управления регуляторов тока в обмотках электромагнитов.

В составе системы управления выделяются отдельные каналы, каждый из которых должен обеспечить управление положением ротора по одной координате. Количество таких каналов определяется количеством координат и для рассматриваемой системы [2] равно девяти.

Аналогово-цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в  $n$ -разрядное двоичное число. Количество разрядов числа ( $n$ ) определяется требованиями к точности измерения сигнала. В состав преобразуемых сигналов входят сигналы смещения ротора по всем осям всех подшипников, а также частота вращения ротора и его угловое положение. Общее количество входных сигналов для обеспечения управления положением ротора составляет 11 шт.

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме  $n$ -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов "датчик – преобразователь датчика". Измерительная характеристика представляет собой зависимость значения физической величины от значения входного сигнала и в общем случае является нелинейной. Масштабирование производится путем интерполяции (кусочно-линейной или полиномиальной) принятого значения сигнала в границах допустимого диапазона значений входных сигналов.

Регулирование положения ротора по пропорционально – интегрально - дифференциальному закону представляет собой вычисление значения тока  $I_{reg}$  в текущий момент времени  $t$  по формуле:

$$I_{reg}(t) = K_p S(t) + K_d \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t} + K_i S(t) \Delta t + K_i \Delta t \sum_{i=1}^n S(t - i \Delta t), \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $K_p$  – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм;  $S(t)$  - смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени  $t$ , мм;  $K_d$  – коэффициент дифференцирования регулятора, А·мм/с;  $\Delta t$  – время цикла работы управляющего контроллера, с;  $S(t - \Delta t)$  – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени  $t - \Delta t$ , мм;  $K_i$  – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с);  $n$  – количество циклов работы контроллера с момента включения регулятора;  $i$  – номер цикла контроллера.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции  $I_c$  по формуле:

$$I_c = I_a \cdot \sin(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

где  $I_a$  – величина вектора виртуальных сил, А;  $\alpha$  – угловое положение ротора, рад;  $\varphi$  – угловое направление вектора виртуальных сил по оси  $I$ , рад;

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора  $f$  (когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора турбомашин).

Значения величины  $I_a$  и  $\alpha$  могут быть заданы двумя способами:

- по результатам экспериментального подбора значений, обеспечивающих приемлемую амплитуду колебаний ротора в рамках установленных резонансных частот ротора;
- путем оценки амплитуды колебаний ротора и фазы колебаний ротора относительно регулируемой координаты по методу дискретного преобразования Фурье для выбранной частоты (примем к рассмотрению этот вариант, как требующий наибольшего количества вычислений).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате. Обмотки электромагнита условно обозначим как «левую» и «правую». Выбор осуществляется в зависимости от настройки датчика смещения ротора: если прижать ротор к «левой» обмотке, то смещение ротора будет отрицательным, если прижать ротор к «правой» обмотке то смещение ротора будет положительным. Далее представлены формулы, по которым формируется выходной сигнал регулятора положения вала:

$$U_L = 5 \cdot \frac{I_{ref\_L} - I_{reg}}{I_{max}} \quad (3)$$

и

$$U_R = 5 \cdot \frac{I_{ref\_R} - I_{reg}}{I_{max}}, \quad (4)$$

где  $U_L$  и  $U_R$  – напряжения на выходах контроллера, подаваемые на усилители мощности "левой" и "правой" обмоток электромагнитов, В;  $I_{max}$  – предельное максимальное значение тока в обмотке электромагнита, которое может сформировать усилитель мощности, А;  $I_{ref\_L}$  и  $I_{ref\_R}$  – токи смещения "левой" и "правой" обмоток электромагнита, т.е. постоянные составляющие, добавляемые в сигнал управления обмоток электромагнита совместно с переменной составляющей (током выхода регулятора), А;  $I_{reg}$  – значение тока, формируемое регулятором в момент времени  $t$  в зависимости от положения ротора по формуле (1), А.

Далее полученные значения выходных напряжений контроллера  $U_L$  и  $U_R$  необходимо привести в соответствие с диапазоном входного сигнала регуляторов тока (напряжение от 0 до 5 В) следующим образом:

- если полученное значение выходного напряжения контроллера меньше 0 В, то на выход подается 0 В;
- если полученное значение выходного напряжения контроллера больше 5 В, то на выход подается 5 В;
- если полученное значение выходного напряжения контроллера находится в пределах от 0 до 5 В, то на выход оно подается без изменений.

Цифро-аналоговое преобразование представляет собой преобразование  $n$ -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В). Количество разрядов числа ( $n$ ) определяется требованиями к точности выдачи сигнала. В состав преобразуемых сигналов входят выходные напряжения для управления токами во всех полюсах всех радиальных и осевого подшипников. Общее количество выходных сигналов для обеспечения управления положением ротора составляет 18.

### 3. Расчет быстродействия и выбор оптимальной структуры

Для реализации заданных функций в составе средств вычислительной техники системы управления предусматриваются:

- ПЭВМ пульта управления;

- контроллеры управляющие согласующие;
- контроллеры управляющие;
- локальные вычислительные сети.

Основной функцией системы управления, требующей высокого быстродействия, является управление положением ротора по всем координатам, реализуемое управляющими контроллерами. Для построения контроллера предусматривается промышленный микропроцессорный контроллер, обеспечивающий реализацию назначенных функций. Далее рассмотрим их структуру.

Выполнение этих функций предусматривает реализацию девяти независимых регуляторов положения ротора. Выполнение этих функций может быть реализовано последовательно на одном контроллере или параллельно на нескольких контроллерах. Увеличение количества контроллеров позволяет увеличить быстродействие системы. Низкое быстродействие, вызванное уменьшением количества контроллеров, снижает возможности системы управления по отработке внешних возмущений на высоких частотах, вызываемых вращением ротора, резонансными эффектами и другими внешними силами, прилагаемыми к ротору.

Требования в части быстродействия к системе управления в целом и к структуре управляющих контроллеров, в частности, сводятся к выбору и обоснованию постоянной времени для каждого компонента системы. Состав и структура управляющих контроллеров должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить значение постоянной времени контроллера, которое не превышает требуемого значения. К настоящему времени это значение не выбрано, однако ранее проведенные экспериментальные проработки показали обоснованность выбора постоянной времени на основе сравнения быстродействия разных вариантов структуры управляющих контроллеров с показателями динамики ротора в рабочем диапазоне частот. Далее представлен расчет быстродействия системы при различном количестве контроллеров.

Оценка постоянной времени контроллера производится следующим образом:

- на основании анализа алгоритмов управления и других функциональных требований оценивается количество вычислительных и других операций различных типов (элементарных операций), выполнение которых возложено на контроллер;
- на основании экспериментальных данных оценивается время выполнения элементарных операций всех типов контроллерами различной вычислительной мощности;
- оценивается время выполнения набора операций, требуемого для реализации всех функций контроллера для различных вариантов структуры и вычислительной мощности контроллера.

Таблица 1

**Количество операций по типам, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора**

Функция, реализуемая в составе регулятора	Количество операций по типам							
	×	÷	+	-	≥	=	АЦП (опер.)	ЦАП (опер.)
1. Аналого-цифровое преобразование (функция)	0	0	0	0	0	0	3	0
2. Масштабирование	9	0	5	0	0	0	0	0
3. Регулирование	2	1	1	1	0	1	0	0
4. Формирование вектора виртуальных сил	16	0	9	0	0	0	0	0
5. Формирование сигналов управления	6	2	1	1	4	4	0	0
6. Цифро-аналоговое преобразование (функция)	0	0	0	0	0	0	0	2
<b>ИТОГО</b>	<b>33</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

Далее производится расчет угла, на который успеет повернуться ротор за время, эквивалентное постоянной времени контроллера. На основании значений этих углов производится выбор оптимальной структуры контроллеров, обеспечивающей достаточно малый угол поворота ротора на частоте вращения, соответствующей верхней границе рабочего диапазона частот.

Количество операций по типам, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора, представлено в табл. 1.

Общее время выполнения всех операций, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора в данном случае, будет вычисляться по формуле:

$$t_{\text{общее}} = 33 \cdot t_{\text{умножения}} + 3 \cdot t_{\text{деления}} + 16 \cdot t_{\text{сложения}} + 2 \cdot t_{\text{вычитания}} + 4 \cdot t_{\text{сравнения}} + 5 \cdot t_{\text{присвоения}} + 3 \cdot t_{\text{ацп}} + 2 \cdot t_{\text{цап}}, \quad (5)$$

где  $t$  – время выполнения одной операции каждого типа.

Необходимо отметить, что при расчете учтены только алгоритмы, экспериментально отработанные на имеющемся стенде [1]. Другие алгоритмы управления, такие как фильтрация, компенсация нелинейности силовой характеристики магнитов также могут быть учтены с использованием описанной методики путем добавления в формулу времени выполнения этих функций.

Для получения данных о времени выполнения элементарных операций проведены экспериментальные оценки по результатам выполнения 10 млн операций каждого типа контроллеров трех типов (по вычислительной мощности). Технические характеристики контроллеров представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Технические характеристики контроллеров различной вычислительной мощности, использовавшиеся для выполнения оценки**

Вариант	А	Б	В
Тип микроконтроллера	6040	5066	CPU686
Системная шина	ISA 8-разр.	ISA 8-разр.	ISA 8-разр.
Процессор	Intel 386SX 25 МГц	AMD 5x86 133МГц	Geode GXLV 200МГц
Сопроцессор	Нет	Есть	Есть
Память ОЗУ, Мбайт	2	32	32
Каналы аналогового ввода	Встроенные в плату – 8	Плата АП16-5А-1 – 8 дифференциальных	Плата АП16-5А-1 – 8 дифференциальных
Каналы аналогового вывода	Встроенные в плату – 2	Плата А016-V16 – 16	Плата А016-V16 – 16

Для проведения экспериментов выбраны имеющиеся в наличие платы, что не исключает использования в дальнейшем более дешевых плат, обладающих аналогичными показателями, но изготовленных другими производителями или плат с более высокими показателями.

Время выполнения элементарных операций по типам для различных вариантов вычислительной мощности контроллера представлено в табл. 3.

Различные варианты построения структуры управляющего контроллера представлены в табл. 4. Рассчитанное значение постоянной времени для этих вариантов структуры КУ представлено на рис. 1.

Таблица 3

Время выполнения элементарных операций по типам для различных вариантов вычислительной мощности,  $\cdot 10^{-9}$  с

Операция	Вариант		
	а	б	В
	6040	5066	CPU686
АЦП	15000	15000	15000
Умножение	16560	167	45
Деление	37180	636	195
Сложение	5381	144	45
Вычитание	5806	144	45
Сравнение	3164	129	80
Присвоение	8581	334	55
ЦАП	15000	15000	15000

Таблица 4

Различные варианты построения структуры контроллера

Номер варианта структуры	Количество контроллеров	Количество регуляторов положения ротора в одном контроллере максимальное
1	1	9
2	2	5
3	3	3
4	5	2
5	9	1

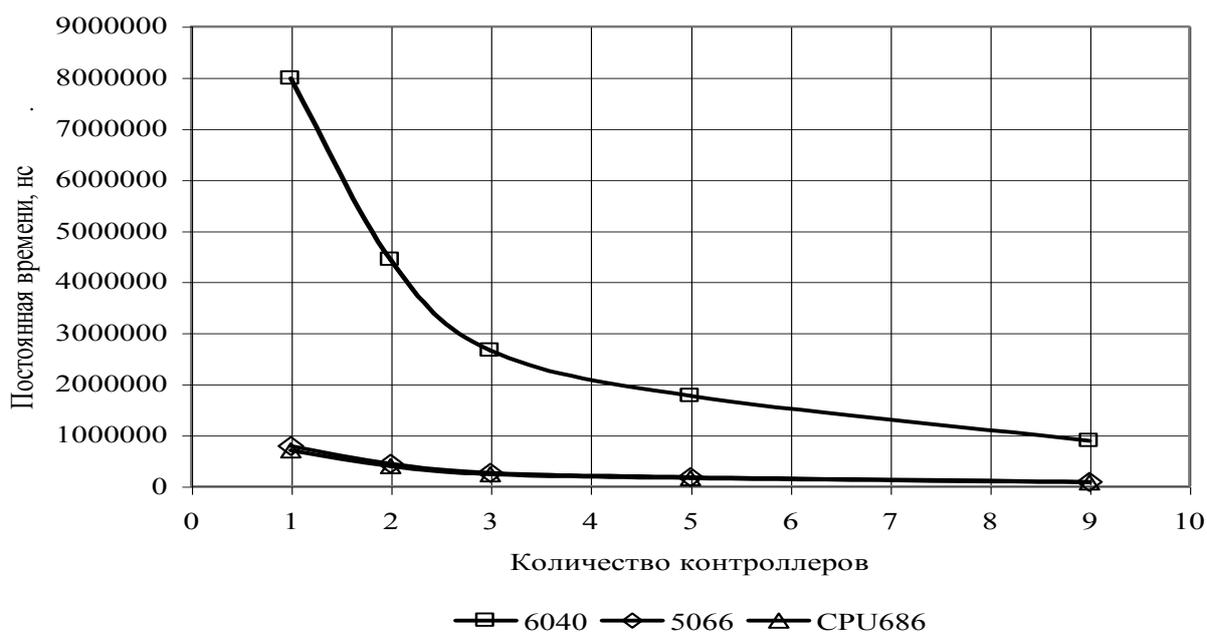


Рис. 1. Рассчитанное значение постоянной времени для различных вариантов структуры контроллеров и вычислительной мощности

Из графика видно, что постоянная времени контроллеров 6040 достаточно велика и составляет от 0,9 до  $8 \cdot 10^{-3}$  с в зависимости от количества контроллеров. Постоянная времени контроллеров 5066 и CPU686 значительно меньше постоянной времени контроллеров 6040 и составляет от 0,08 до  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с. Такое различие (в  $\sim 10$  раз) объясняется отсутствием математического сопроцессора в контроллере 6040 и низкой тактовой частотой (25 Гц).

Далее рассчитаем угол  $\alpha$ , на который успеет повернуться ротор за время, эквивалентное постоянной времени контроллеров. Верхняя граница рабочего диапазона частот составляет  $60 \cdot \text{с}^{-1}$ . Время  $T$ , за которое ротор совершает один оборот на  $360^{\circ}$ , составляет  $0,0166 \text{ с}$  – период вращения ротора. Угол  $\alpha$  вычисляется по формуле:

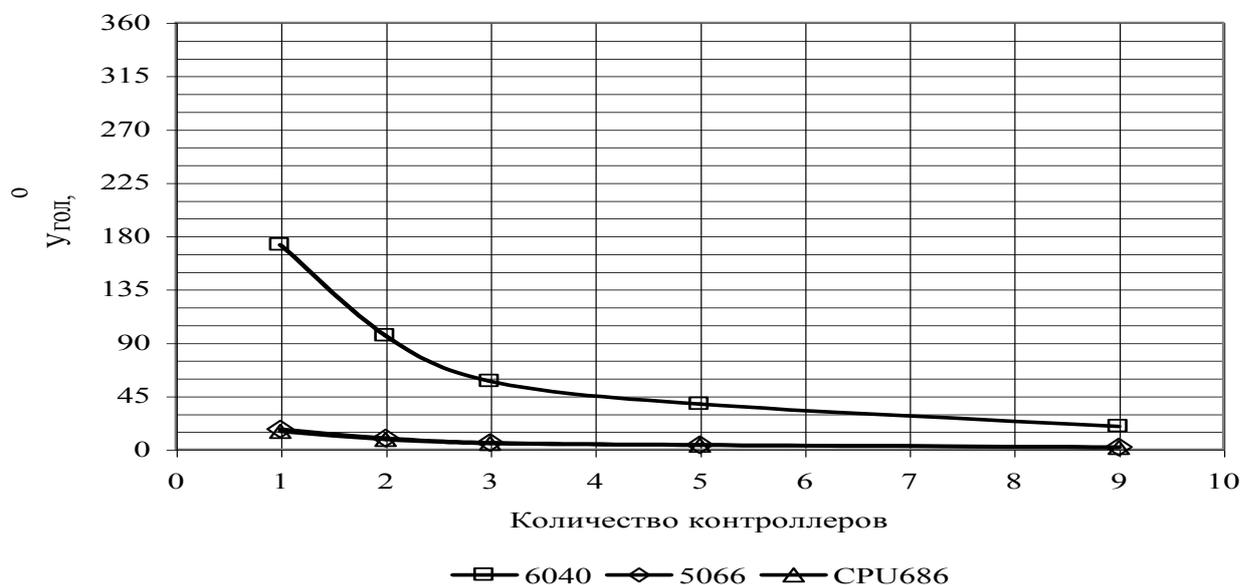
$$\alpha = 360 \cdot \frac{t_{\text{общее}}}{T}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{общее}}$  – постоянная времени контроллеров;  $T$  – период вращения ротора.

Рассчитанные значения углов  $\alpha$  для рассматриваемых вариантов структуры контроллеров и их вычислительной мощности контроллеров представлены на рис. 2.

Как видно из графика, угол  $\alpha$ , получаемый при использовании одного контроллера 6040, достигает почти  $180^{\circ}$ , что представляется недопустимым, так как в этом случае входное воздействие на контроллер не компенсируется регулятором, а наоборот усиливается, и в результате возникают биения ротора о страховочные подшипники.

По результатам экспериментальных проработок на макете ротора значение угла  $\alpha$ , равное  $15^{\circ}$ , обеспечивает амплитуду колебаний ротора до 150 мкм при частоте вращения до  $95 \text{ с}^{-1}$ . Исходя из консервативных предпосылок, принимаем, что предельное значение угла  $\alpha$  для рассчитываемой системы должно быть менее  $5^{\circ}$ .



**Рис. 2. Рассчитанные значения углов  $\alpha$  для рассматриваемых вариантов структуры КУ и вычислительной мощности контроллеров**

Таким образом, из рассмотрения исключаются все варианты с контроллером 6040, а также варианты с контроллерами 5066 и CPU686 с 1, 2 и 3 контроллерами. Структура контроллера в рамках рассматриваемой системы управления может быть построена на базе пяти или девяти контроллеров. В первом случае каждый контроллер обслуживает две оси регули-

рования. Во втором случае каждый контроллер обслуживает одну ось регулирования. Для дальнейшей проработки принимается вариант с пятью контроллерами, так как он обеспечивает более полные возможности по модернизации алгоритмов управления в части взаимосвязей осей регулирования.

Контроллер CPU686 обеспечивает лучшие скоростные показатели по сравнению с 5066 за счет повышенной тактовой частоты, поэтому для построения управляющего контроллера принимается этот вариант. Постоянная времени контроллера для выбранного варианта составляет 156950 нс, быстродействие (частота дискретизации), соответственно  $6371 \text{ с}^{-1}$ .

В настоящее время на рынке промышленных контроллеров уже появились процессорные платы, оснащенные процессорами с тактовой частотой 800 МГц и более. В дальнейшем возможно увеличение этого показателя и соответственно увеличение быстродействия.

На рис. 3 приведена оценка значения угла  $\alpha$  выбранного варианта для рабочего диапазона частот и выше, что позволит оценить выбранный вариант построения системы управления с точки зрения модернизации в случае изменения требований по рабочему диапазону частот.

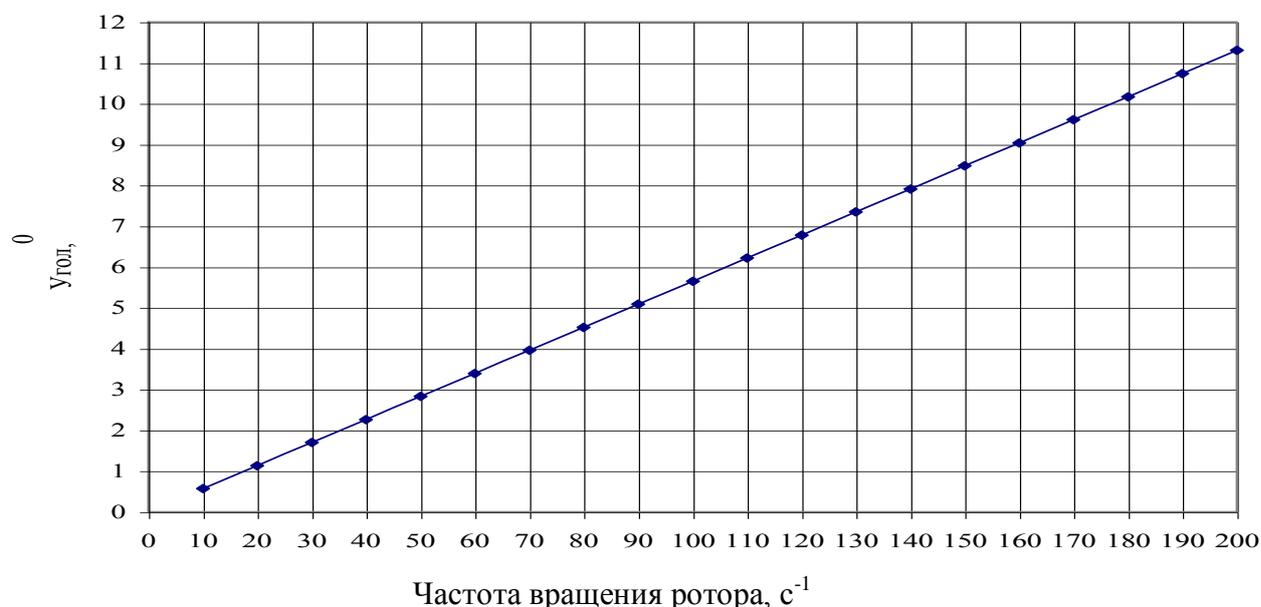


Рис. 3. Оценка значения угла  $\alpha$  выбранного варианта для рабочего диапазона частот и выше

### Вывод

Описанный метод расчета отработан при создании системы управления макетом ротора турбомшины [1, 2, 3] и может применяться для расчета микропроцессорных систем управления, предназначенных для регулирования.

### Библиографический список

1. **Kodochigov, N.G.** Control system of electromagnetic bearing / N.G. Kodochigov [at al.] // 5. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2001. Zittau-Kassel. ФРГ. Р. 59–68.
2. **Kodochigov, N.G.** Calculation and substantiation of the structure and composition of microprocessor controllers in the digital control system of electromagnetic suspension multisupport system /

- N.G. Kodochigov [at al.] // 6. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2003. Kassel. Germany. P. 161–169.
3. **Mitenkov, F.M.** Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant / F.M. Mitenkov [at al.] Khodykin // Proceedings of conference "PHYSCON2003" Sanct -Peterburg, Russia, 2003. С. 146–151.

*Дата поступления  
в редакцию 19. 07.2011*

**I.V. Drumov**

### **MICROPROCESSOR-BASED POSITION CONTROL SYSTEM OF A TURBOMACHINE ROTOR FOR NUCLEAR POWER PLANT**

A calculation of microprocerssor-based position control system of a turbomachine rotor for nuclear power plant is presented. Optimum alternative of system structure is found, it provide a possibility to control of rotor position according to specified algorithms with sufficient operating speed. Described method may be used for calculation of microprocerssor-based control system, aimed for regulation.

*Key words:* microprocessor, controller, control system, rotor, turbomachine, nuclear power plant.