

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ГИБКИМИ РОТОРАМИ

А.П. Сарычев, И.Г. Руковицын  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*При создании системы управления магнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов с гибкими роторами существует задача по оптимизации частотных характеристик системы регулирования магнитным подвесом. Выбор параметров управления магнитного подвеса реализуется при помощи математической модели системы автоматического управления магнитными подшипниками.*

**Ключевые слова:** валопровод, система автоматического управления магнитными подшипниками, магнитный подвес.

В настоящее время управление электромагнитными подшипниками гибких роторных машин является сложной задачей, при решении которой используются традиционные методы [1].

Точное определение собственных частот колебаний валопроводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и запасов отстроек от скоростей вращения не гарантирует отсутствия проблем при настройке регуляторов системы автоматического управления магнитных подшипников (САУ МП).

Закон управления МП определяется в результате синтеза динамических характеристик объекта управления (валопровода) в САУ МП. В свою очередь, выбор параметров регулятора, производящийся на математических моделях, позволяет получить амплитудные и фазовые значения САУ МП, необходимые для эффективного регулирования магнитного подвеса. Для этого требуется выработать оптимальные и доступные способы настройки регуляторов САУ МП, которые должны повысить качество эксплуатации гибких роторных агрегатов.

Управление магнитным подвесом ротора компрессора ГПА построено по принципу выбора параметров регулирования в САУ МП. Система активного магнитного подвеса, осуществляя управление токами в электромагнитах, обеспечивает регулирование подшипниковыми опорами, т. е. усилиями, воздействующими на ротор [2]. В САУ МП используется пропорциональное интегро-дифференцирующее звено (ПИД-регулятор) с режекторными фильтрами (рис. 1), функционирующими в ограниченной области частот, в пределах которой находится возбуждающаяся частота  $\omega$ , (рад/с) упругой формы колебаний валопровода ГПА. Регулятор САУ МП математически представляется в качестве передаточной функции:

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{x(p)}{u(p)} = W_{\text{пид}}(p)W_{\text{ф}}(p), \quad (1)$$

где  $u(p)$ ,  $x(p)$  – функции входных и выходных величин;  $W_{\text{пид}}(p)$ ,  $W_{\text{ф}}(p)$  – передаточные функции ПИД-звена и режекторного фильтра.

Передаточная функция (1) описывает обобщенную программу управления для систем с упругими объектами регулирования. Для получения закона управления «жестким» ротором достаточно из структурной схемы исключить режекторный фильтр. В этом случае передаточная функция регулятора будет аналогична передаточной функции ПИД-регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = W_{\text{пид}}(p). \quad (2)$$

Характерным достоинством управления с ПИД-регулятором (2) является обеспечение запаса устойчивости по фазе (демпфированию). К недостаткам можно отнести увеличение коэффициента усиления на высоких частотах, что приводит к возбуждению собственных форм колебаний ротора. В свою очередь алгоритм управления, описываемый передаточной функцией (1), обладает необходимыми свойствами по стабилизации высоких частот упругих форм колебаний роторной системы и одновременно понижает коэффициент усиления регулятора. Недостаток регулирования – некоторое ухудшение динамических качеств системы управления электромагнитным подвесом за пределами частотного диапазона, охваченного режекторным фильтром. Регулятор САУ МП, представленный на рис. 1, отражает основной принцип, по которому осуществляется управление частотами изгибных форм колебаний ГПА.

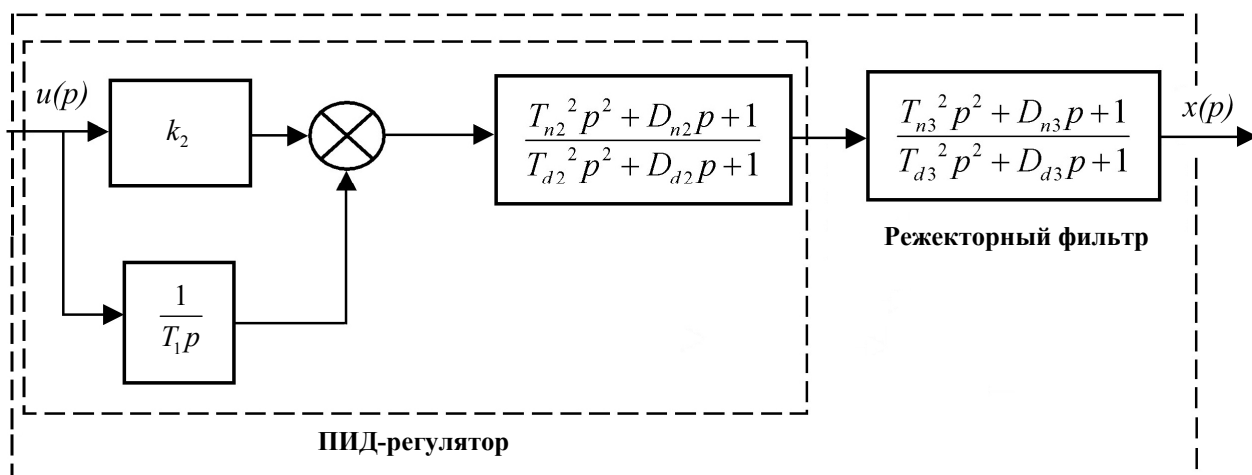


Рис. 1. Структурная схема регулятора в САУ МП

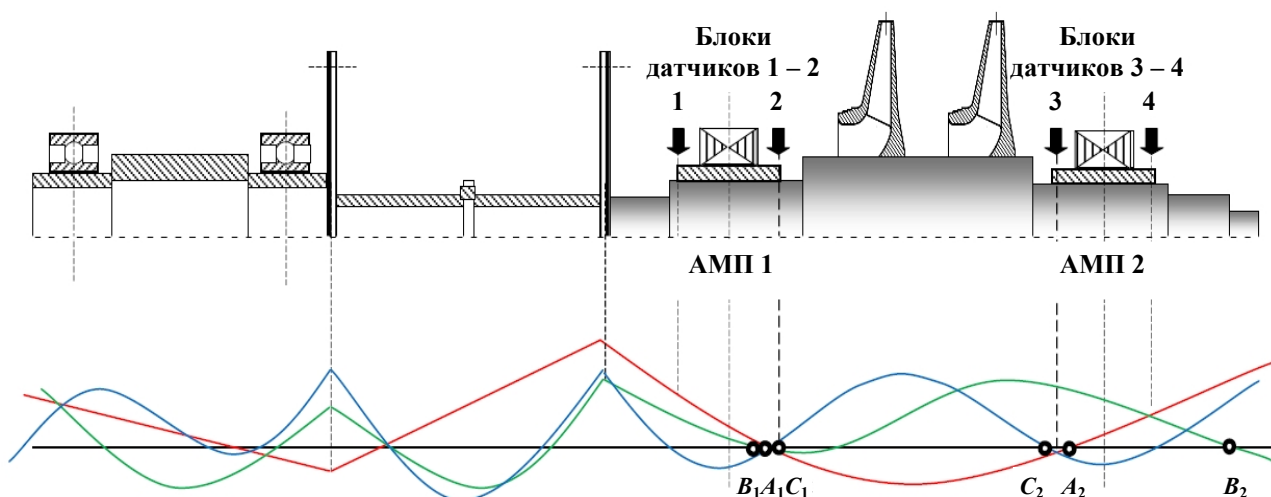


Рис. 2. Упругие формы колебаний валопровода:  $A_1, B_1, C_1$  – характерные узловые точки собственных форм ротора компрессора в АМП1;  $A_2, B_2, C_2$  – характерные узловые точки собственных форм ротора компрессора в АМП2

Эффективность демпфирования колебаний валопровода во многих случаях зависит не только от типа применяемого регулятора, но и от взаимного расположения точек управления, измерения, а также узлов собственных форм колебаний ГПА. При проектировании системы магнитного подвеса на ее амплитудно-частотные характеристики оказывают существенное влияние места установки датчиков положения и электромагнитных опор [2, 3]. Если, например, центры подшипников размещены в узлах какой-либо собственной формы, то демпфирование колебаний по этой форме будет нулевым при любом законе управления. Компенсирование возбуждающихся частот изгибных форм колебаний валопрово-

да и, следовательно, уменьшение их влияния на подвес возможно за счет радиальных блоков датчиков, наиболее удачно размещенных относительно узловых точек изгибных форм колебаний. Это может быть сделано при помощи подключений датчиков активных МП по симметричным схемам 1 – 4 и 2 – 3, а также несимметричным 1 – 3 и 2 – 4 (рис. 2). Согласно данной оптимизации в системе регулирования МП создаются наименьшие усилия, которые обеспечивают устойчивую динамическую характеристику подвеса на определенной частоте колебаний валопровода. Этот прием широко используется для поддержания демпфирующей способности магнитного подвеса роторов ГПА.

## Собственные частоты валопровода и ротора компрессора ГПА-ЦЗ-16С/76-1,7М

Номер формы	Валопровод ГПА		Изолированный ротор компрессора		Погрешность $\mu, \%$
	Частота $f, \text{Гц}$	Круговая частота $\omega, \text{с}^{-1}$	Частота $f, \text{Гц}$	Круговая частота $\omega, \text{с}^{-1}$	
1	19,02	119	19,13	120	0,58
2	30,81	193	30,59	192	0,71
3	58,08	365	59,42	373	2,26
4	121,50	763	131,31	825	7,47
5	135,35	850	239,41	1504	43,47
6	185,03	1162	348,07	2187	46,84

Проанализировать особенности управления МП можно на примере валопровода ГПА-ЦЗ-16С/76-1,7 М мощностью 16 МВт с диапазоном скоростей вращения  $n = 3640 - 5460$  об/мин. В таблице представлены расчетные значения собственных частот колебаний валопровода ГПА-ЦЗ-16С/76-1,7М и изолированного ротора компрессора данного ГПА с присоединенной массой половины трансмиссии 90 кг на приводном конце. По результатам динамических расчетов видно, что первые три частоты колебаний валопровода и ротора компрессора практически совпадают.

Первые две частоты 19,02 и 30,81 Гц ротора компрессора в составе валопровода соответствуют твердым балочным формам колебаний, а остальные являются изгибными. Однако с повышением собственных форм колебаний сильно возрастает погрешность в частотах, которая сильно влияет на достоверность выбора параметров регулятора САУ МП. Поэтому для осуществления качественного синтеза и анализа САУ МП необходимо учитывать исключительно динамические характеристики валопровода.

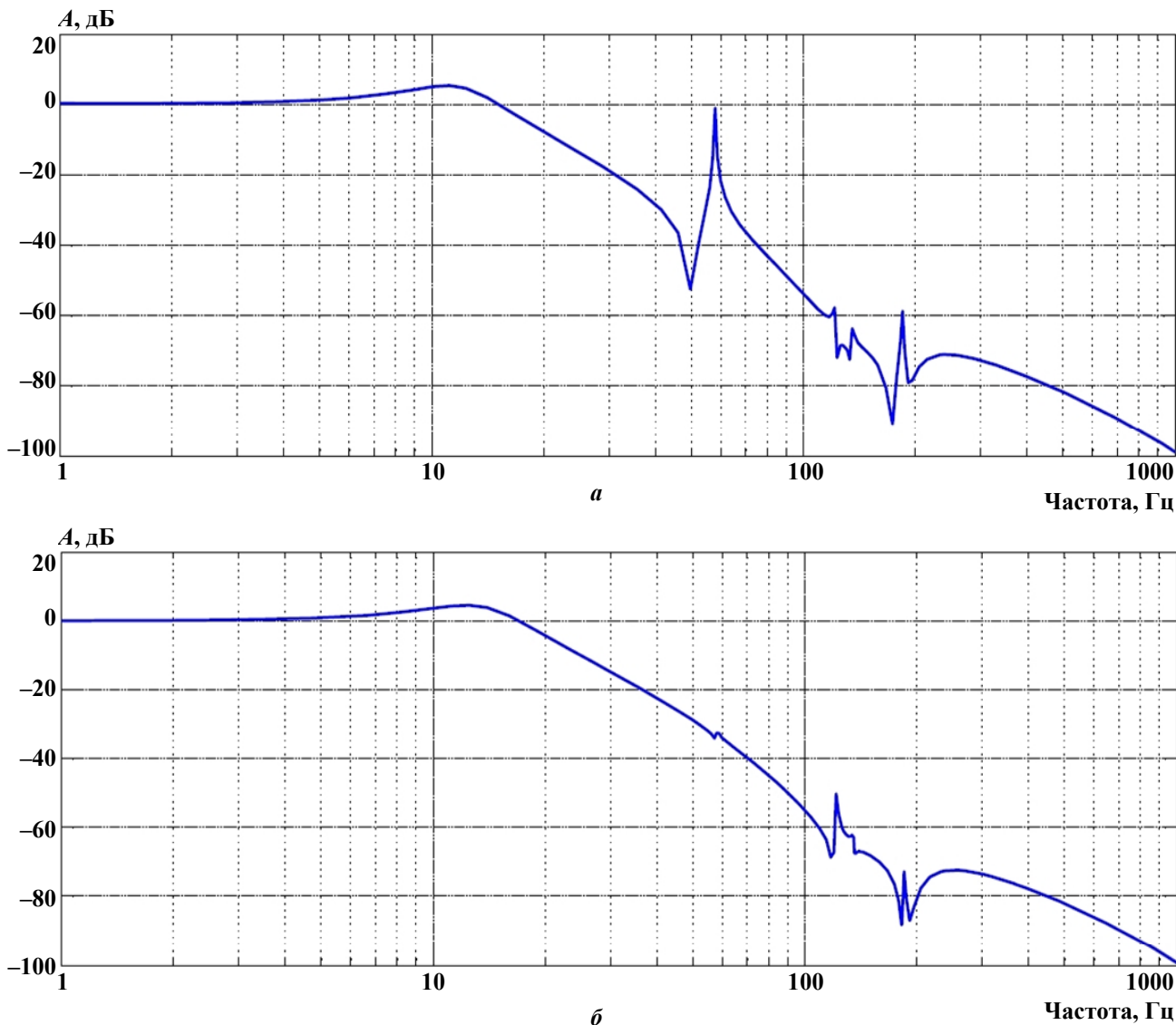
Ротор на МП называется жестким, если частота, соответствующая первой изгибной форме колебаний находится выше максимальной рабочей скорости вращения, и гибким, если ротор работает между частотами, соответствующими первой и второй изгибным формам колебаний. В нашем случае роторный агрегат является гибким, так как обладает первой изгибной формой колебаний ротора компрессора с критической частотой 58 Гц, расположенной ниже минимальной скорости вращения.

Структурная схема САУ МП, состоящая из регулятора, электромагнита и ротора, подробно

представлена в работе [1]. Постоянные коэффициенты передаточных функций ПИД-регулятора и режекторных фильтров определяются в зависимости от динамики роторной системы. При управлении магнитным подвесом ротора как твердого тела необходимо, чтобы пиковое значение фазово-частотной характеристики ПИД-регулятора находилось в области резонансных частот колебаний ротора компрессора.

На амплитудно-частотной характеристике ПИД-звена коэффициент усиления увеличивается с ростом частоты. Как правило, расчет параметров по традиционным формулам не гарантирует получения требуемой частотной характеристики регулятора. В результате необходим тщательный выбор параметров, который производится на математической модели ПИД-регулятора (см. рис. 1) при поддержке специализированного пакета прикладных программ.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) канала системы управления для двух способов регулирования МП. Как видно из АЧХ (рис. 3, а) максимальный коэффициент усиления на частоте около 12 Гц не превышает значения, установленного требованиями к системе, т. е.  $k_y \leq 2$  ( $A = 5,3$  дБ). Следующая АЧХ (рис. 3, б) оптимизирована и является следствием выбора внутренней схемы 2 – 3 расположения датчиков АМП (см. рис. 2). Главным образом данный вид синтеза САУ МП направлен на компенсацию амплитуды колебаний первой упругой формы валопровода с частотой 58 Гц. Регулятор системы дополнительно не настраивался. Изменения коснулись параметров математической модели ротора в блоке коэффициентов форм датчиков [1].



**Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики замкнутого канала САУ МП:**  
***a* – без компенсации колебаний валопровода ГПА; *б* – с компенсацией колебаний валопровода ГПА**

При получении расчетных АЧХ была использована структурная схема (математическая модель) замкнутой САУ МП, которая включает регулятор, исполнительный орган (электромагнит) и ротор [1]. Регулятор САУ МП содержит следующие параметры (постоянные времени):

$$\begin{aligned}
 k_2 &= 1; T_1 = 0,2 \text{ с}; T_{n2} = 0,045 \text{ с}; \\
 D_{n2} &= 0,11 \text{ с}; T_{d2} = 0,0003 \text{ с}; D_{d2} = 0,0042 \text{ с}; \\
 T_{n3} &= T_{d3} = (\omega_6)^{-1} = (1162 \text{ с})^{-1} 0,86e - 3 \text{ с}; \\
 D_{n3} &= 0; D_{d3} = 0,5T_{n3} = 0,5T_{d3} = 0,43e - 3 \text{ с}.
 \end{aligned}$$

Исполнительный орган описывается передаточной функцией  $W_{ЭМ}(p) = k_3 / (Tp + 1)$  аperiodического звена с постоянной времени электромагнита  $Tp = 0,005 \text{ с}$  и коэффициентом усиления  $k_3 = 1$ .

Стоит пояснить следующее: значения постоянных коэффициентов  $T_{n3}$ ,  $T_{d3}$ ,  $D_{n3}$  и  $D_{d3}$  рассчитаны для «половинчатого» режекторного фильтра, установленного на частоту упругих колебаний валопровода 185 Гц.

Принцип работы фильтров наглядно иллюстрируется соответствующими частотными характеристиками (рис. 4). Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) регулятора с «половинчатым» режекторным фильтром по отношению к варианту с параметрами  $T_{n3} = T_{d3} = (\omega_6)^{-1}$ ,  $D_{n3} = 0$ ,  $D_{d3} = T_{n3} = T_{d3}$  имеет больший фазовый запас в диапазоне частот от 20 до 185 Гц. АЧХ регулятора при произведенных настройках режекторных фильтров (рис. 4) практически совпадают, и коэффициент усиления остается без изменения.

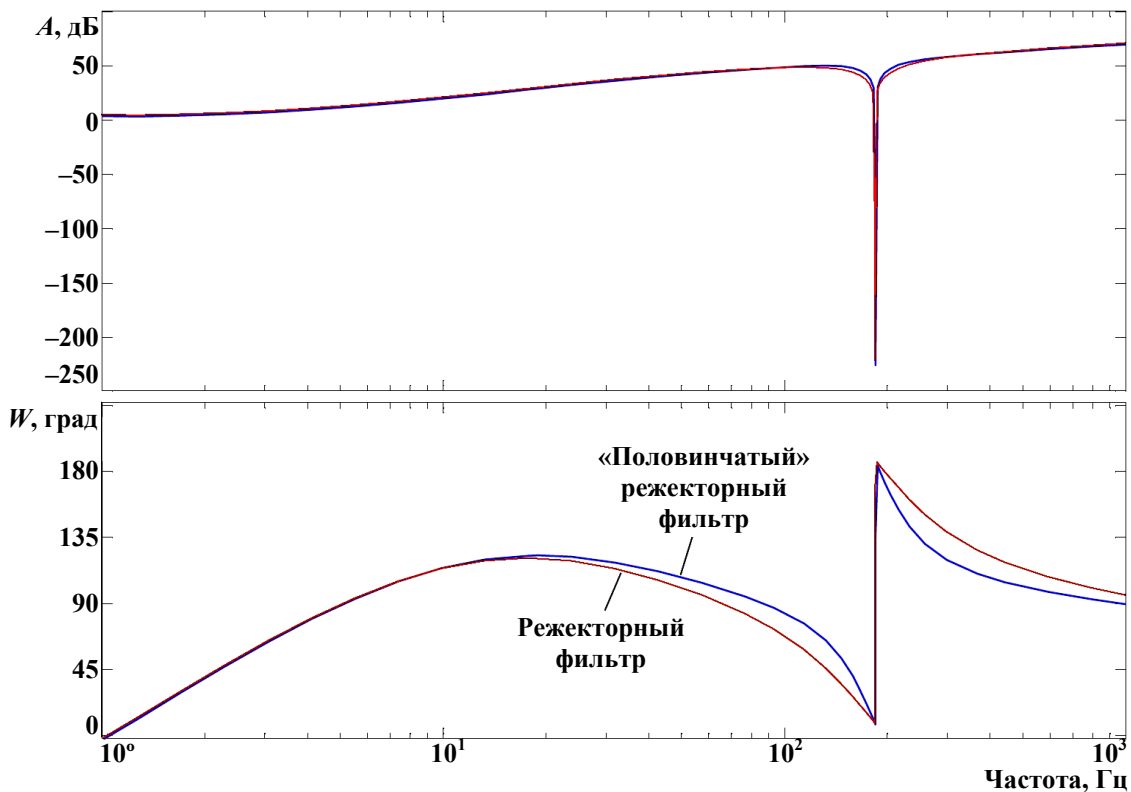


Рис. 4. Частотная характеристика (АЧХ и ФЧХ) регулятора САУ МП при различных параметрах режекторного фильтра

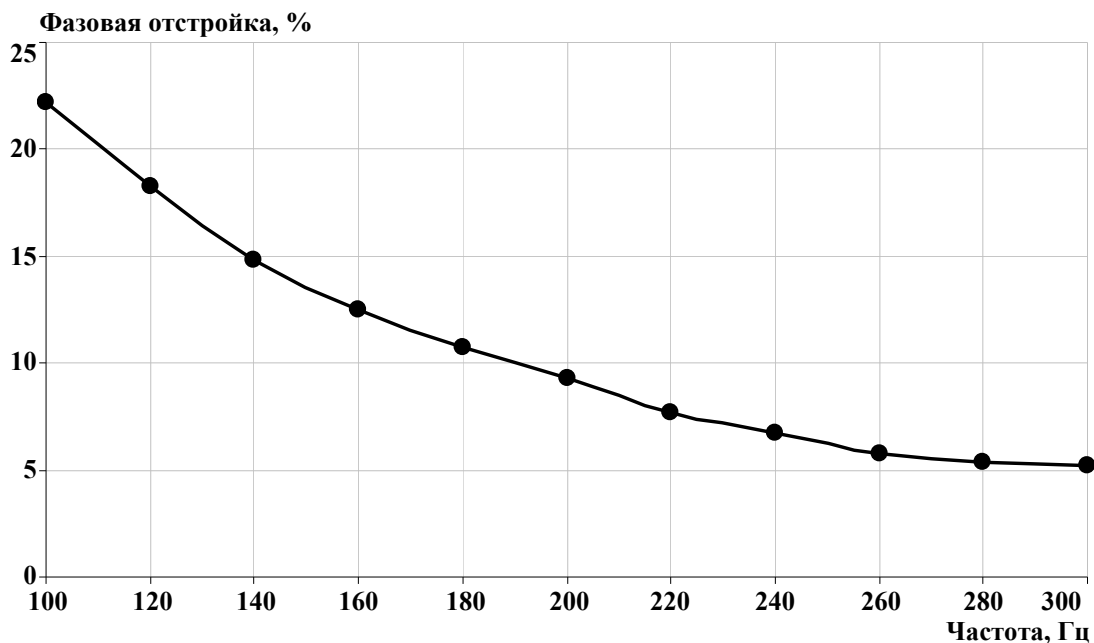


Рис. 5. Зависимость отстройки фазовых значений регулятора от частоты

Для гибких роторных систем с МП важно правильно устанавливать режекторные фильтры на высоких частотах колебаний. При этом степень отстройки собственных частот упругих форм колебаний валопровода играет существенную роль в на-

стройке регулятора. При последовательной установке режекторных фильтров (см. рис. 4) в диапазоне от 100 до 300 Гц с интервалом 20 Гц была построена зависимость изменения фазовых отстроек частотной характеристики регулятора (рис. 5).

На резонансной частоте 58 Гц отстройка с ростом частоты снижается с 22 до 5%. Таким образом, «половинчатый» режекторный фильтр позволяет частично компенсировать фазовый запас в зоне рабочих частот вращения ГПА. Поэтому в регуляторах для гибких роторных систем с МП целесообразно использовать данный тип режекторных фильтров.

Предложенная методика по настройке фильтров в САУ МП на частоты упругих форм колебаний роторных агрегатов в районе 200 Гц применяется на всех последних типах ГПА. Этот принцип, благодаря своей эффективности, целиком оправдывает себя, особенно на высоких частотах колебаний валопровода. Однако как показывает практика, в диапазоне около 200 Гц и выше в системе управления могут дополнительно возбуждаться частоты изгибных форм колебаний валопровода с преобладающим влиянием гибкой трансмиссии или ротора компрессора. В этом случае можно задействовать второй режекторный фильтр с определенными настроечными параметрами. Поэтому при проектировании ГПА, а также на стадии модального ана-

лиза роторной машины обращается особое внимание на собственные частоты валопровода в диапазоне от 100 до 200 Гц. Данные частоты стараются отодвинуть как можно дальше в высокочастотную область или увеличить отстройку между ними. Это достигается, например, за счет сокращения габаритной длины промежуточного вала трансмиссии ГПА, что позволяет успешно провести оптимизацию динамических характеристик гибкого ротора для системы регулирования МП компрессора ГПА.

#### Литература

1. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А. П. Сарычев, И. Г. Руковицын // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 107. – С. 11 – 15.
2. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю. Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.: ил.
3. Магнитный подвес для гибких роторов компрессоров / А.И. Яковлев, В.И. Ефанов, А.П. Сарычев [и др.] // Газовая промышленность. – М.: Газоил пресс, 2000. – №. 2. – С. 51 – 52.

Поступила в редакцию 15.12.2009

*Алексей Петрович Сарычев*, канд. техн. наук, зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 365-56-29.  
*Илья Геннадьевич Руковицын*, инженер, т. 366-35-65.  
E-mail: vniiem@vniiem.ru.