

Компрессорная техника и пневматика



Compressors & Pneumatics

3/май
2015

СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, РЕКОНСТРУКЦИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РОССИИ

- Систем зажигания и управления промышленными двигателями (HOERBIGER Engine Solutions, Altronic)
- Мобильных компрессорных установок в контейнерном исполнении (МКУ HOERBIGER)
- Центробежных компрессоров (HOERBIGER TurboTech)
- Сервисное обслуживание, ремонт и поставка оригинальных запасных частей для газовых двигателей GE Waukesha



ООО «ХЁРБИГЕР»

Тел./Факс: + 7 495 221-06-78

Email: moscow@hoerbiger.com

www.hoerbiger.com



Дистрибутор
и авторизованный сервисный партнер
Waukesha gas engines

HOERBIGER
because performance counts

Динамическая модель выходного звена регулятора активных магнитных подшипников центробежного нагнетателя ГПА

А.В. Андрианов, Я.З. Гузельбаев, Э.В. Сусликов

(ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

niitk@niitk.ru

Предложена структурная схема динамической модели выходного звена контура стабилизации системы активного магнитного подвеса (АМП) центробежных компрессоров, включающего выходные каскады регуляторов тока с ШИМ-регулированием и электромагниты АМП. Приведены соотношения, позволяющие определить коэффициенты для расчета характеристик динамической модели.

Ключевые слова: активный магнитный подвес, регулятор тока с ШИМ-регулированием, электромагнит, динамическая модель выходного звена активного магнитного подвеса.

Behavioral pattern of the output link of active magnetic bearings' regulator of GTU centrifugal compressor

A.V. Andrianov, Ya.Z. Guzelbaev, E.V. Soslikov (CJSC «NIIturbokompressor n.a.V.B. Shnep», HMS Group)

The block diagram of dynamic model of a target link of a contour of stabilization of system active magnetic bearings (AMB) for centrifugal compressors, including target cascades of regulators of a current with PWM – regulation and electromagnets AMB is offered. The ratio are resulted, allowing to determine factors for calculation of characteristics of dynamic model.

Keywords: active magnetic bearing, a regulator of a current with PWM-regulation, an electromagnet, dynamic model of a target link active magnetic bearings.

Широкое внедрение активных магнитных подшипников (АМП) в центробежные нагнетатели газоперекачивающих агрегатов (ГПА), особенно при отношении давлений $\pi > 3$, сдерживается недостаточной устойчивостью системы ротор – АМП, что в процессе работы ГПА ведет к периодическим повышениям вибрации ротора и частым аварийным остановам агрегата. Нестабильная работа АМП нагнетателей ГПА вызывает недоверие потребителей к безмасляным центробежным компрессорам, которые в условиях Севера, Западной Сибири и морских платформ являются очень привлекательными.

Для обеспечения устойчивости и качества стабилизации АМП необходима глубокая теоретическая проработка вопросов динамики, требующая применения достоверных математических моделей всех звеньев, составляющих контуры стабилизации регулятора АМП.

В статье [1] рассмотрены вопросы конструктивного исполнения и расчета геометрических, нагрузочных и электрических характеристик радиальных электромагнитов систем АМП.

В системах АМП роторных машин регулирование тока в обмотках электромагнитов осуществляется автоматически, путем создания замкнутых контуров автоматической стабилизации по пяти осям ротора. Входным сигналом регуляторов каждого из контуров является сигнал отклонения ротора от центрального положения по рассматриваемой оси стабилизации, а выходной реакцией контура – изменение тока в электромагнитах данной оси.

Очевидно, что для обеспечения устойчивости и качества стабилизации ротора по любой из пяти осей (четыре оси в двух радиальных подшипниках и одна ось в осе-

вом подшипнике АМП) должны быть определены динамические характеристики всех звеньев контуров автоматической стабилизации.

Далее рассматриваются вопросы определения динамических характеристик выходного звена замкнутого контура автоматической стабилизации, образованного выходными каскадами регуляторов тока с ШИМ-регулированием и электромагнитами АМП.

Отметим, что в современных системах АМП в выходных каскадах регуляторов тока применяют широтно-импульсные методы (ШИМ) регулирования тока, что позволяет при широком диапазоне регулирования существенно снизить потери мощности в регуляторе. Вместе с тем в каскадах с ШИМ-регулированием имеют место некоторые особенности в части определения динамических характеристик выходного звена контура стабилизации.

На рис. 1 приведены основные схемы силовых цепей выходных каскадов регуляторов тока с ШИМ-регулированием. Выходные каскады содержат управляемые транзисторные ключи ($T_1 \dots T_4$), неуправляемые силовые диоды (D_1, D_2) (в однотактной схеме) и соответственно подключенный электромагнит ($\mathcal{E}M$) системы АМП. Для реализации каскада по схеме рис. 1, а необходим двухполлярный источник электропитания со средней точкой и с выходными напряжениями $\pm E$, а по схемам на рис. 1, б, в – однополлярный источник электропитания с выходным напряжением $+ E$.

ШИМ-регулирование заключается в периодическом поочередном включении на время t_1 (или t_2) соответствующих транзисторных ключей, при этом регулирование длительности t_1 приводит к изменению тока



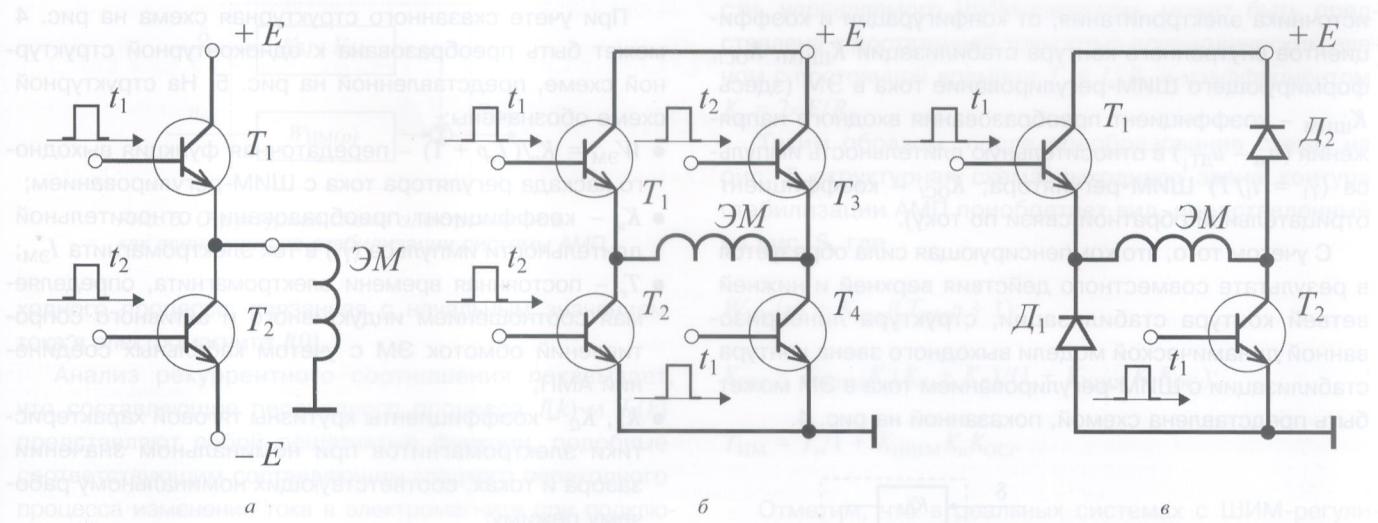


Рис. 1. Основные схемы силовых цепей выходных каскадов регуляторов тока с ШИМ-регулированием:
а, б – двухтактные выходные каскады; в – однотактный выходной каскад.

в обмотке возбуждения ЭМ. ШИМ-регулирование предполагает постоянство периода коммутации ТК транзисторных ключей, причем $T_k = t_1 + t_2$. В однотактном выходном каскаде время t_2 соответствует длительности открытого состояния неуправляемых диодов D_1, D_2 под действием ЭДС самоиндукции обмотки ЭМ.

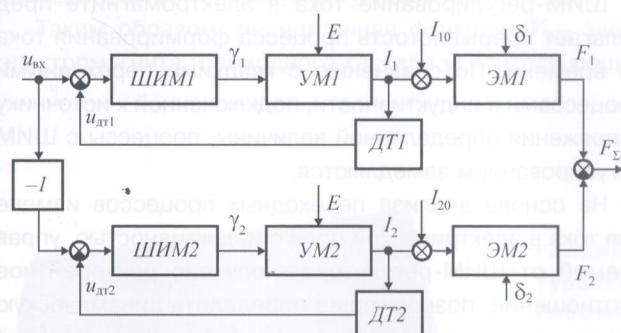


Рис. 2. Функциональная схема выходного звена контура стабилизации системы АМП:
 $\mathcal{EM}_1, \mathcal{EM}_2$ – электромагниты, формирующие компенсирующую силу по одной из пяти осей стабилизации ротора системы АМП; $УM_1, УM_2$ – выходные каскады импульсных усилителей мощности, реализованные по одной из схем рис. 1; $ШИМ_1, ШИМ_2$ – широтно-импульсные модуляторы, преобразующие сигнал управления в импульсы управления транзисторными ключами усилителей мощности; DT_1, DT_2 – датчики тока в обмотках возбуждения соответственно $\mathcal{EM}_1, \mathcal{EM}_2$, формирующие сигнал отрицательной обратной связи по току электромагнитов

Функциональная схема выходного звена контура стабилизации системы АМП (рис. 2) содержит две идентичные ветви, каждая из которых формирует токи в электромагнитах рассматриваемой оси стабилизации. Так как электромагниты $\mathcal{EM}_1, \mathcal{EM}_2$ одной оси стабилизации при отклонении ротора от центрального

положения создают противоположно направленные силы, приращение результирующей силы положительного направления образуется за счет одновременного увеличения тока в верхней ветви и уменьшения тока в нижней ветви. Аналогично приращение силы отрицательного направления образуется за счет одновременного уменьшения тока в верхней ветви и увеличения тока в нижней ветви контура стабилизации. На рис. 3 приведен конкретный пример тяговых характеристик верхнего \mathcal{EM}_1 и нижнего \mathcal{EM}_2 электромагнитов и результирующая тяговая характеристика выходного звена контура стабилизации, иллюстрирующий вышесказанное.

Динамические свойства выходного звена контура стабилизации зависят от постоянной времени электромагнитов T_e верхней и нижней ветвей, от величины зазоров в электромагнитах δ_1, δ_2 , от напряжения питания E

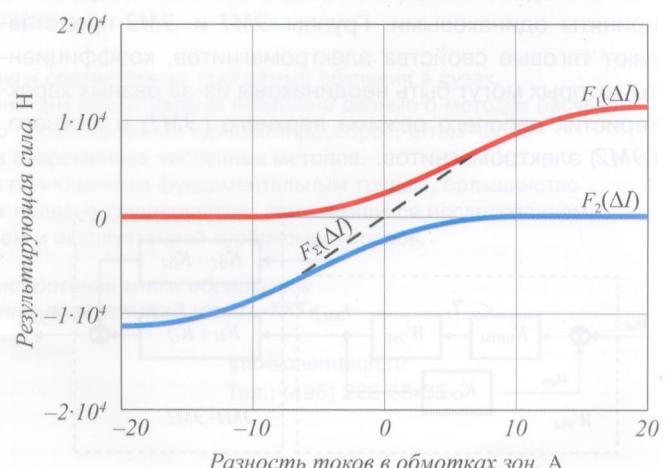


Рис. 3. Тяговые характеристики выходного звена одного из контуров стабилизации при начальных настройках тока $I_{10} = I_{20} = 5$ А

источника электропитания, от конфигурации и коэффициентов внутреннего контура стабилизации $K_{\text{шим}}$, $K_{\text{OC}i}$, формирующего ШИМ-регулирование тока в ЭМ (здесь $K_{\text{шим}}$ – коэффициент преобразования входного напряжения ($u_{\text{вх}} - u_{\text{ДТ}_1}$) в относительную длительность импульса ($\gamma_1 = t_1/T$) ШИМ-регулятора; $K_{\text{OC}i}$ – коэффициент отрицательной обратной связи по току).

С учетом того, что компенсирующая сила образуется в результате совместного действия верхней и нижней ветвей контура стабилизации, структура линеаризованной динамической модели выходного звена контура стабилизации с ШИМ-регулированием тока в ЭМ может быть представлена схемой, показанной на рис. 4.

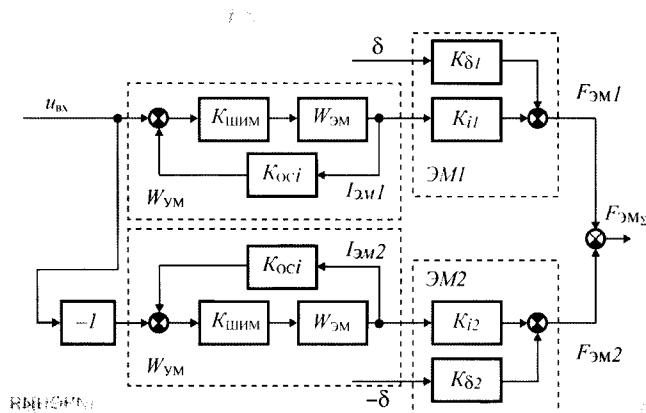


Рис. 4. Структурная схема динамической модели выходного звена контура стабилизации АМП

На структурной схеме пунктиром выделены функциональные группы звеньев $W_{\text{УМ}}$, ЭМ1, ЭМ2, участвующие в преобразовании сигнала управления $u_{\text{вх}}$ в результатирующую силу $F_{\text{ЭМ}\Sigma}$. Группа $W_{\text{УМ}}$ представляет звенья электронной части выходного звена контура стабилизации АМП, при этом коэффициенты звеньев верхнего и нижнего контуров стабилизации при анализе могут быть приняты одинаковыми. Группы ЭМ1 и ЭМ2 представляют тяговые свойства электромагнитов, коэффициенты которых могут быть неодинаковы из-за разных характеристик рабочего режима верхнего (ЭМ1) и нижнего (ЭМ2) электромагнитов.

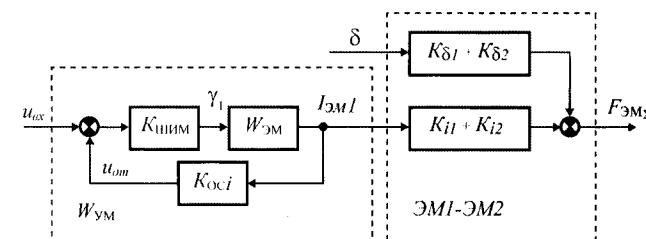


Рис. 5. Одноконтурная структурная схема динамической модели выходного звена

При учете сказанного структурная схема на рис. 4 может быть преобразована к одноконтурной структурной схеме, представленной на рис. 5. На структурной схеме обозначены:

- $W_{\text{ЭМ}} = K_u / (T_e p + 1)$ – передаточная функция выходного каскада регулятора тока с ШИМ-регулированием;
- K_u – коэффициент преобразования относительной длительности импульса (γ_1) в ток электромагнита $I_{\text{ЭМ}}$;
- T_e – постоянная времени электромагнита, определяемая соотношением индуктивного и активного сопротивлений обмоток ЭМ с учетом кабельных соединений АМП;
- K_{i1}, K_{i2} – коэффициенты крутизны тяговой характеристики электромагнитов при номинальном значении зазора и токах, соответствующих номинальному рабочему режиму;
- $K_{\delta 1}, K_{\delta 2}$ – коэффициенты чувствительности тяговой характеристики электромагнита к изменению зазора δ между статором и ротором.

Для конкретной реализации выходного звена контуров стабилизации АМП определение перечисленных коэффициентов структурной схемы не представляет большой сложности, за исключением определения коэффициента K_u . Отметим особенности определения этого коэффициента.

ШИМ-регулирование тока в электромагните предполагает прерывистость процесса формирования тока во времени. По сравнению с гладкими переходными процессами в индуктивности, подключенной к источнику напряжения определенной величины, процессы с ШИМ-регулированием замедляются.

На основе анализа переходных процессов изменения тока в электрической цепи с индуктивностью, управляемой от ШИМ-регулятора, получено рекуррентное соотношение, позволяющее определить динамическую зависимость тока в индуктивности $I(\gamma)$ от относительной длительности γ ШИМ-сигнала:

$$I(\gamma) = I(k)[1 - 2\gamma + \tau_L(1 - \gamma)] + I_0(k),$$

где $\tau_L = T_k R_L / L$ – относительное значение постоянной времени электромагнита; L, R_L – соответственно индуктивность и активное сопротивление электромагнита с учетом кабельных соединений АМП;

$$I(k) = -\left[\tau_L E \sum_n \exp(-n\tau_L) \right] / R_L$$

– составляющая переходного процесса, связанная с установившимся значением тока в электромагните; E – напряжение источника питания выходного каскада усилителя мощности; k, n – текущее и конечное число циклов коммутаций ШИМ-регулятора в рассматриваемом переходном процессе ($k = 1, 2, \dots, n$); $I_0(k) = -I(0) \exp(-\tau_L k)$ – составляющая пере-





Рис. 6. Структурная схема электромагнита как звена контура стабилизации системы АМП полу-

ходного процесса, связанная с начальным значением тока в электромагните $I(0)$.

Анализ рекуррентного соотношения показывает, что составляющие переходного процесса $I(k)$ и $I_0(k)$ представляют собой решетчатые функции, подобные соответствующим составляющим гладкого переходного процесса изменения тока в электромагните при подключении его к источнику постоянного напряжения величиной E . При этом форма огибающей кривой переходного процесса решетчатых функций соответствует экспонентам с постоянной времени электромагнита R_L/L и с установившимися значениями $I(\infty) = E/R_L$; $I_0(\infty) = 0$.

Выражение в квадратных скобках рекуррентного соотношения отражает функцию ШИМ-регулирования тока и представляет практически линейную функцию, изменяющуюся от 1 до -1 при изменении относительной длительности γ импульса управления от 0 до 1.

Таким образом, передаточная функция W_{EM} звена электромагнита и выходного каскада усилителя мощно-

сти, управляемого ШИМ-сигналом, может быть представлена с достаточной точностью апериодическим звеном с постоянной времени $T_e = L/R_L$ и коэффициентом $K_u = 2 \times E/R_L$.

Таким образом, после преобразования схемы на рис. 5 структурная схема выходного звена контура стабилизации АМП приобретает вид, представленный на рис. 6, где

$$W_{IM}(p) = K_{IM}/(T_{IM}p + 1);$$

$$K_{IM} = K_{SHIM}K_u(K_{l1} + K_{l2})/(1 + K_{SHIM}K_uK_{OCi});$$

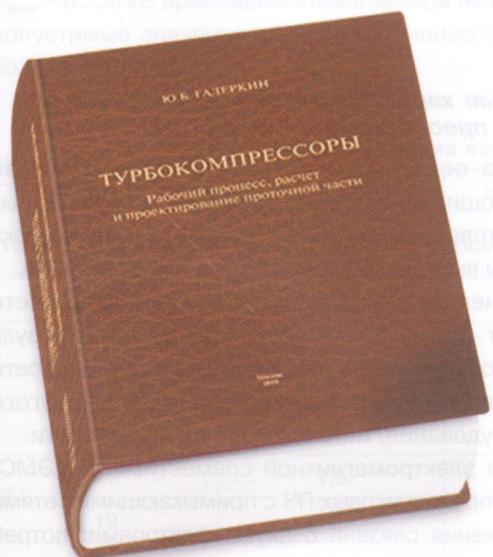
$$T_{IM} = T_e/1 + K_{SHIM}K_uK_{OCi}.$$

Отметим, что в реальных системах с ШИМ-регулированием тока наличие отрицательной обратной связи по току (K_{OCi}) позволяет существенно повысить быстродействие выходного звена контура стабилизации АМП (уменьшить постоянную времени T_{IM}) за счет соответствующего выбора коэффициентов K_{SHIM} , K_u , K_{OCi} .

Значения коэффициентов K_{l1} , K_{l2} , $K_{\delta 1}$, $K_{\delta 2}$ определяются по результатам расчета тяговой характеристики конкретной конструкции электромагнитов.

Список литературы

- Харитонов А.П., Андрианов А.В., Сусликов Э.В., Ахметзянов А.М. Страхов Г.П. Радиальный электромагнит как элемент системы активного магнитного подвеса//Компрессорная техника и пневматика. 2013, №4.



ГАЛЕРКИН Ю.Б.

Турбокомпрессоры.

Рабочий процесс, расчет и проектирование проточной части.

М.: ООО «Информационно-издательский центр «КХТ». 2010. – 596 с. – С ил.
ISBN 978-5-9902032-1-1

Содержание книги соответствует программе обучения в вузах, но одновременно там представлены новейшие данные о методах расчета и оптимального проектирования турбокомпрессоров, в том числе с применением современных численных методов.

Книга является полноценным фундаментальным трудом, большинство разделов будет полезно специалистам, занимающимся исследованием, проектированием и эксплуатацией турбокомпрессоров.

По вопросу приобретения книги обращаться
в Информационно-издательский центр «КХТ»

info@chemtech.ru

Тел.: (495) 223-66-35