

УДК 537.87

О. Н. АГАМАЛОВ (канд. техн. наук)

Ташлыкская гидроаккумулирующая электростанция

aon@ukrsat.mk.ua; o_agamalov@sunpp.atom.gov.ua

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОШИБКИ

В статье рассмотрены системы автоматического управления с обратной связью, ошибка управления которых вычисляется как комплексная разность между заданной уставкой и выходом объекта управления. Предложен способ измерения комплексной ошибки с использованием преобразования Гильберта. Рассмотрены варианты регуляторов по модулю, действительной и мнимой составляющим комплексной ошибки. Определены области устойчивости регуляторов на основе комплексной ошибки в зависимости от фазового запаздывания и нелинейной функции объекта управления.

Нелинейная система, преобразование Гильберта, комплексная ошибка обратной связи, устойчивость, система возбуждения.

Введение. Обзор литературы [1-6] показывает, что наряду с современными направлениями разработки САУ, продолжают исследоваться различные варианты классического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора [7-10], который для объектов управления в промышленности, энергетике, транспорте и других отраслях, по-прежнему остается самым распространенным. Однако ПИД-регулятор, вследствие его линейных свойств, не применим для объектов управления, которые характеризуются:

- временными задержками;
- колебательным характером динамики (комплексные полюса с малым затуханием);
- изменением параметров в различных эксплуатационных режимах;
- несколькими входами и выходами.

Учитывая сложность, а в большинстве случаев невозможность, установки датчиков для измерения переменных состояния объекта, управление им предпочтительно выполнять на основе информации об изменении выхода объекта управления y в зависимости от входа регулятора r с учетом реальных параметров вероятностных величин n и d . В данной постановке, задачу управления предлагается решать путем увеличения размерности ошибки САУ (т.е. определения внутренней структуры ошибки управления), параметры которой позволят учесть внутренние свойства объекта, его временные задержки, что в конечном итоге позволит уменьшить число настраиваемых параметров регулятора. Для этого предлагается измерять не только величины y и r , но также и временные (фазовые) отношения между изменениями входа регулятора r и выхода объекта управления y с учетом воздействий n и d . Таким образом, вводится определение двумерной ошибки управления [11], которая находится как комплексная (в двумерном случае или как векторная в многомерном случае) разность значений **вектора уставки (входов регулятора)** и **вектора выхода** объекта управления.

Статья включает в себя разделы со следующим содержанием. Во втором разделе приведено определение комплексной ошибки замкнутого контура САУ, предложен метод ее измерения, основанный на представлении входов-выходов объекта управления в виде аналитических сигналов и использовании преобразования Гильберта для расчета разностей их мгновенных фаз. Определена возможность применения САУ на основе комплексной ошибки для одномерных и многомерных объектов управления. В третьем разделе рассмотрены схемы регуляторов по модулю, действительной и мнимой составляющим комплексной ошибки для объектов управления с одним входом и одним выходом, а также рассмотрены условия устойчивости САУ на основе комплексной ошибки в зависимости от фазового запаздывания и нелинейной функции объекта управления. Пример применения регуляторов на основе комплексной ошибки для управления возбуждением синхронного гидрогенератора, работающего через длинную линию электропередачи в энергосистеме большой мощности, приведен в четвертом разделе. В выводах кратко отражено содержание данной статьи.

Комплексная ошибка САУ. Для получения дополнительной информации о процессах, происходящих в объекте, увеличим размерность ошибки управления, учтя временное (фазовое) смещение между измеряемым выходом и уставкой, определив, таким образом, ее в комплексном виде (см. рис. 1):

$$e = r - y\Sigma = e_R + je_I.$$

Тогда модуль e , фазовое запаздывание $\Delta\phi$, действительная e_R и мнимая e_I составляющие комплексной ошибки определяются как:

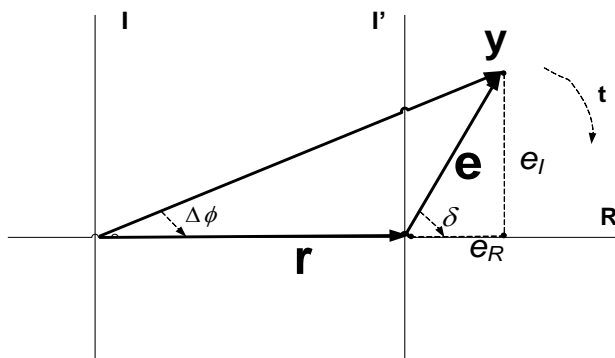


Рисунок 1 - Комплексная ошибка САУ

© Агамалов О. Н., 2011

$$\begin{aligned}
 e^2 &= r^2 + y_\Sigma^2 - 2 \cdot r \cdot y_\Sigma \cdot \cos(\Delta\phi); \\
 \Delta\phi &= \arctg\left(\frac{e_I}{r + e_R}\right); \\
 e_R &= r - y_\Sigma \cdot \cos(\Delta\phi) = \bar{e} \cdot \cos \delta; \\
 e_I &= y_\Sigma \cdot \sin(\Delta\phi) = \bar{e} \cdot \sin \delta,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\Delta\phi$ – фазовое смещение (разность мгновенных фаз) между вектором уставки r и вектором выхода объекта управления y_Σ во введенной декартовой системе координат $R - I$, δ – аргумент комплексной ошибки в декартовой системе координат $R - I'$, рис.2. Разность мгновенных фаз $\Delta\phi$ между вектором уставки r и вектором выхода объекта управления y_Σ может быть определена с использованием преобразования Гильберта [12, 13], представив их в виде аналитических сигналов. Тогда можно определить мгновенную фазу $\phi(t)$ реального сигнала экспериментально, измеряя скалярные временные последовательности $s[t]$ данного сигнала. Относительная фаза, или разность мгновенных фаз для одномерной САУ с одним входом r и одним выходом y (single input single output - SISO) может быть определена как [13]:

$$\Delta\phi_{yr} = \phi_y(t) - \phi_r(t) = \arctg \frac{\tilde{y}(t) \cdot r(t) - y(t) \cdot \tilde{r}(t)}{y(t) \cdot r(t) + \tilde{y}(t) \cdot \tilde{r}(t)}.
 \tag{2}$$

где знаком \sim обозначена мнимая составляющая аналитического сигнала.

Системы управления на основе комплексной ошибки. Рассмотрим модель одномерной системы управления, описываемой дифференциальными уравнениями в форме Коши по выходу объекта управления, (рис. 2):

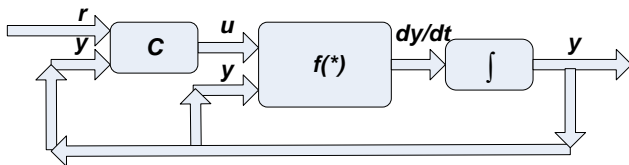


Рисунок 2 - Модель системы управления в форме Коши

где C – регулятор,
 $f(*)$ – нелинейная функция объекта управления,
 \int – интегратор,
 r – заданная уставка,
 u – сигнал управления,
 y – выход объекта управления.

$$\dot{y}(t) = y(t) \cdot f(*) + u(t).
 \tag{3}$$

Для модели системы управления (3) рассмотрим следующие регуляторы C на основе комплексной ошибки: по действительной составляющей комплексной ошибки e_R , по мнимой составляющей комплексной ошибки e_I и по модулю комплексной ошибки e :

$$\begin{aligned}
 u(t) &= -K_R \cdot e_R(t) = -K_R \cdot (r - y \cdot \cos(\Delta\phi)), \quad u(t) = -K_I \cdot e_I(t) = -K_I \cdot y \cdot \sin(\Delta\phi), \\
 u(t) &= -K_e \cdot e(t) = -K_e \cdot \sqrt{r^2 + y_\Sigma^2 - 2 \cdot r \cdot y_\Sigma \cdot \cos(\Delta\phi)}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где K_R K_I K_e – коэффициенты регуляторов.

Верхняя граница диапазонов изменения коэффициентов регуляторов (4) определяется исходя из анализа устойчивости САУ используя теорему второго метода Ляпунова об устойчивости для нелинейных систем. Определим функцию Ляпунова в квадратичной форме относительно используемой на входе регулятора составляющей комплексной ошибки и сигнала управления. Тогда, например, для регулятора по действительной составляющей комплексной ошибки e_R получим:

$$V(e_R, u) = e_R^2 + u^2 = (1 + K_R^2) e_R^2 = (1 + K_R^2) \cdot (r^2 + y^2 \cos^2(\Delta\phi) - 2yr \cos(\Delta\phi)) > 0
 \tag{5}$$

Функция (5) является положительно определенной. Вычислив производную функции Ляпунова (5) при $K_R = const$ и $r = const$ вдоль траекторий изменения действительной составляющей комплексной ошибки e_R и управления u получим оценку верхней границы значений коэффициента K_R :

$$K_R < \frac{y}{e_R} \cdot [f(*) - tg(\Delta\phi) \cdot \Delta\phi] = \frac{y}{r - y \cdot \cos(\Delta\phi)} \cdot [f(*) - tg(\Delta\phi) \cdot \Delta\phi]
 \tag{6}$$

Аналогичные оценки могут быть получены для регуляторов по другим составляющим комплексной ошибки.

Пример применения САУ на основе комплексной ошибки. Для исследования предлагаемых САУ на основе комплексной ошибки была использована модель «синхронный генератор - шины бесконечной мощности» (СГ-ШБМ), представленная в MATLAB [14] файлом «power_turbine.mdl». Моделируется работа регулируемого трехфазного синхронного гидрогенератора с номинальными параметрами: полная мощность 200 МВА, номинальное напряжение статора 13.8 кВ, номинальная частота вращения 112.5 мин^{-1} , подсоединенного к энергосистеме мощностью 10 000 МВА и напряжением 230 кВ через блочный трансформатор и длинную линию электропередачи с отношением индуктивного и активного сопротивлений $X/R = 10$. САУ (4) используются для регулирования возбуждения синхронного гидрогенератора. Исследовались возникающие переходные процессы для двух возмущений начального установившегося режима:

1. Подача ступенчатого сигнала величиной - 0.2 о. е. по входу уставки по напряжению;
2. Возникновение трехфазного короткого замыкания в сети 230 кВ длительностью 0.2 с.

Параметры возникающих переходных процессов сравнивались для различных схем регуляторов (4), а также для регулирования возбуждения тиристорной системой возбуждения типа ST2A по стандарту *IEEE Std 421.5-1992* [15]. Для оценки верхней границы значений коэффициентов регуляторов (4) в соответствии с (5), (6) в качестве нелинейной функции $f(*)$ объекта управления – синхронного гидрогенератора, использовалась его нагрузочная характеристика $U_S = f(I_f)$, где U_S – напряжение статора, I_f – ток возбуждения [16]. Значение нелинейной функции $f(*)$ определялось как тангенс угла наклона касательной в точке, соответствующей начальному установившемуся режиму работы (рабочей точке) с номинальными параметрами $U_S = 1 \text{ о. е.}$, $I_f = 1 \text{ о. е.}$, т.е. $f(*) = \Delta U_S / \Delta I_f$. В соответствии с приведенными нагрузочными характеристиками гидрогенераторов, для индуктивной нагрузки с различными значениями $\cos\varphi$, вычисляемое значение нелинейной функции составило $f(*) = 0.58-1$. При фазовом запаздывании моделируемой системы СГ-ШБМ в диапазоне $\Delta\varphi \in [0, \pi/2]$, верхняя граница значений коэффициентов для регулятора по действительной составляющей комплексной ошибки e_R и регулятора по модулю комплексной ошибки e : $(K_R, K_e) < 5$. Для регулятора по мнимой составляющей комплексной ошибки e_I при тех же условиях: $K_I > 1$ при $\Delta\varphi \rightarrow \pi/2$ и $K_I > \infty$ при $\Delta\varphi \rightarrow 0$, что соответствует невозможности достижения устойчивости САУ с регулятором по мнимой составляющей комплексной ошибки при отсутствии или малых фазовых запаздываниях в объекте управления. Для моделирования были приняты значения коэффициентов регуляторов $K_R = K_e = K_I = 3$. Интегрирование дифференциальных уравнений модели выполнялось методом численного интегрирования с переменным шагом *ode23tb* с заданной относительной ошибкой между шагами 10^{-3} , что соответствует точности расчета $\approx 0.1 \%$. Моделирование системы СГ-ШБМ также было выполнено для указанных выше возмущений установившегося режима работы для случаев изменения параметров модели: уставки по напряжению генератора $r = 0.8-1.1 \text{ о. е.}$ и изменении параметров энергосистемы: мощности $S = 2000-20000 \text{ МВА}$ и сопротивления $X/R = 1-100$. Анализ полученных в переходных процессах изменений основных параметров, характеризующих работу системы возбуждения в модели СГ-ШБМ показывает, что наилучшие результаты достигаются для САУ с регулятором на основе действительной составляющей комплексной ошибки e_R и САУ с регулятором по модулю комплексной ошибки e . САУ возбуждением типа ST2A и САУ с регулятором на основе мнимой составляющей комплексной ошибки e_I не обеспечивают устойчивую работу гидрогенератора в энергосистеме большой мощности при возникновении значительных внешних возмущений режима работы (внешние КЗ). Наиболее точно напряжение статора поддерживается САУ возбуждением с регулятором на основе действительной составляющей комплексной ошибки e_R , в то время как для САУ с регулятором по модулю комплексной ошибки e в переходном процессе наблюдается перерегулирование величиной порядка 0.1 – 0.2 о.е. Также можно отметить, что рассматриваемые САУ с регулятором на основе действительной составляющей комплексной ошибки e_R и САУ с регулятором по модулю комплексной ошибки e обладают свойствами адаптации к изменению параметров внешней энергосистемы, к которой подключен объект управления – синхронный гидрогенератор. Приведенный пример показывает, что применение САУ на основе комплексной ошибки позволяет использовать однопараметрическую настройку регулятора (коэффициент усиления), т. к. динамические характеристики объекта управления, определяемые фазовым запаздыванием, учитываются (агрегированы) в структуре комплексной ошибки.

Выводы.

1. Предложен принцип САУ на основе комплексной ошибки, которая определяется как комплексная (векторная для многомерных объектов) разность между заданным входным сигналом уставки и выходом объекта управления. Для расчета комплексной ошибки предложено использование преобразования Гильберта, которое позволяет рассмотреть входа и выхода САУ в виде аналитических сигналов.

2. Рассмотрены варианты САУ с регуляторами по модулю, действительной и мнимой составляющим комплексной ошибки. Области устойчивости регуляторов на основе комплексной ошибки определены в зависимости от фазового запаздывания и нелинейной функции объекта управления.

3. Пример САУ на основе комплексной ошибки для управления возбуждением синхронного гидрогенератора показывает возможность однопараметрической настройки регулятора только по коэффициенту усиления, т. к. динамические характеристики объекта управления, определяемые фазовым запаздыванием, учитываются (агрегированы) в структуре комплексной ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Гудвин Г. К., Гребне С. Ф., Сальгадо М. Э. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
2. Дорф Р. Современные системы управления / Дорф Р., Бишоп Р.; пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
3. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы / Мирошник И.В. – СПб: Питер, 2006. – 272с.
4. Isidori A. Nonlinear control systems / Isidori A. – 3^d edition. – Berlin: Springer-Verlag, 1995.
5. Utkin V.I. *Sliding Modes in Optimisation and Control* / Utkin V.I. – Berlin: Springer-Verlag. 1992.
6. Zak S.H. *Systems and Control* / Zak S.H. – New York: Oxford University Press. 2003.
7. Ang K.H. *PID Control System Analysis and Design and Technology* / Ang K.H., Chong G.C.Y, Li Y. // IEEE Transactions on control systems technology. – July 2005. – Vol.13, No.4. – Pp. 559-576.
8. Ang K.H. *PID Control System Analysis and Design. Problems, remedies and future directions* / Ang K. H., Chong G. C. Y, Li Y. // IEEE Control systems magazine. – February 2006. – Pp. 32-41.
9. Armstrong B. *New results in NPID control: tracking, integral control, friction compensation and experimental results* / Armstrong B., Neevel D., Kuzik T. // IEEE Transactions on control systems technology. – 2001. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 399-406.
10. Олссон Г. *Цифровые системы автоматизации и управления* / Олссон Г., Пиани Д. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
11. Agamalov O. N. *Design of Control Systems based on Vector Error* / Agamalov O. N. // WSEAS Transactions on Systems and Control. – September 2009. – Issue 9, volume 4. – pp. 476-485.
12. Hahn S.L. *Hilbert transforms in signal processing* / Hahn S.L. – Boston: Artech House, Inc., 1996.
13. Rosenblum M. *Analyzing Synchronization Phenomena from Bivariate Data by Means of the Hilbert Transform* / Rosenblum M., Kurths J. // Nonlinear Analysis of Physiological Data. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – Pp. 91-99.
14. *SimPowerSystems for use with Simulink. User's guide.* – Version 4. – 2005. – P. 1110.
15. Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. – IEEE Standard 421.5-1992. – August, 1992.
16. Гидрогенераторы / [Глебов И. А., Домбровский В. В., Дукштау А. А. и др.] – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. – 368 с.

Надійшла до редколегії 18.03.2011

Рецензент: О.І.Толочко

О. М. АГАМАЛОВ

Ташлицька гідроакумулююча електростанція

Системи управління на основі комплексної похибки. В статті розглянуті системи автоматичного управління зі зворотним зв'язком, похибка управління котрих обчислюється як комплексна різниця між заданою уставкою та виходом об'єкту управління. Запропоновано спосіб вимірювання комплексної похибки з використанням перетворення Гілберта. Розглянуто варіанти регуляторів по модулю, дійсній та мнимій складовим комплексної похибки. Визначені області стійкості запропонованих регуляторів в залежності від фазового запізнювання та нелінійної функції об'єкта управління.

Нелінійна система, перетворення Гілберта, комплексна похибка зворотного зв'язку, стійкість, система збудження.

O. AGAMALOV

Tashlyk Hydro Pumped Storage Power Plant

Control Systems Based on Integrated Errors. The control systems with a feedback, whose control error is calculated as a complex difference between given setting and a output of control object are considered in the article. The measurement way of a complex error with use a Hilbert transform is offered. Variants of controllers on the module, the real and imaginary components of a complex error are considered. The areas of stability of the proposed regulators depending on the phase delay and a nonlinear function of the control object are defined.

Nonlinear system, Hilbert transform, feedback complex error, stability, excitation system.