Записки Ленинградского орденов Ленина
и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова
т. XXXV, вып. 1, 1957 г.

О КОЭФФИЦИЕНТЕ УСИЛЕНИЯ, ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ И СТАТИЗМЕ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р. П. Чичиванов

1. Объектом регулирования в электромеханической системе является электрическая машина — обычно двигатель или генератор.

Для автоматического управления и регулирования скорости двигателя или напряжения генератора наибольшее распространение получили замкнутые системы с отрицательной обратной (регулирующей) связью. Основным параметром такой системы, определяющим ее качество в установившихся режимах, является коэффициент усиления разомкнутой цепи регулирования K, под которым понимается [3] произведение коэффициентов усиления (преобразования) всех звеньев цепи регулирования. Например, для системы электромашинного управления и регулирования скорости двигателя (см. рис. 1 в предыдущей статье), структурная схема которой представлена на рис. 1, коэффициент усиления разомкнутой цепи регулирования определяется выражением

$$K = K_{\text{у}} K_{\text{г}} K_{\text{д}} K_{\text{о. с}}, \tag{1}$$

где $K_{\text{у}} = \frac{U_{\text{у}}}{AW_{\text{у}}}$ — коэффициент усиления электромашинного усилителя (ЭМУ);

$K_{\text{г}} = \frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{у}}}$ — коэффициент усиления генератора;

$K_{\text{д}} = \frac{n_{\text{д}}}{U_{\text{г}}}$ — коэффициент усиления двигателя;

$K_{\text{о. с}} = \frac{AW_{\text{о. с}}}{n_{\text{д}}}$ — коэффициент усиления обратной связи (тахогенератора).

Из уравнения (1) следует, что в замкнутой системе регулирования с отрицательной обратной связью коэффициент усиления разомкнутой цепи регулирования представляет отношение величины регулирующего воздействия $AW_{\text{о. с}}$, передаваемого обратной связью с выхода на вход, системы к результирующему входному воздействию $AW_{\text{у}}$

$$K = \frac{AW_{\text{о. с}}}{AW_{\text{у}}}. \tag{2}$$

Результирующее входное воздействие в замкнутой системе создается совместным действием задающей $У_{о.з}$ и регулирующей $У_{о.с}$ обмоток управления ЭМУ

$$A W_{у} = A W_{о.з} - A W_{о.с}, \tag{3}$$

где $A W_{о.з}$ — задающее входное воздействие (ампервитки задающей обмотки управления ЭМУ).

На величину коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования K оказывают влияние те же факторы, которые вызывают отклонение действительного значения регулируемого параметра от заданного (изменение нагрузки объекта регулирования, нелинейность характеристик электрических машин, действие системы регулирования и т. п.).

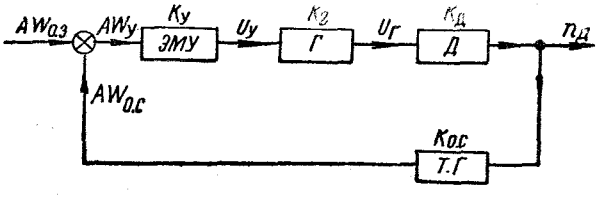


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования скорости двигателя

Наибольший интерес представляют процессы статического регулирования при действии в системе основного возмущающего фактора и изменении нагрузки объекта регулирования. Влияние этого фактора на величину коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования K проявляется: а) непосредственно, вследствие статизма нагрузочных характеристик последних элементов системы (двигателя и генератора); б) в результате стабилизирующего действия системы регулирования, вызывающего изменение результирующего входного воздействия $A W_{у}$ и соответственное изменение коэффициентов усиления усилительных элементов системы (ЭМУ и генератора), вследствие изменения нагрузки и нелинейности характеристик холостого хода этих элементов.

Пользоваться в расчетах коэффициентом, имеющим переменное значение и зависящим от многих факторов, затруднительно, поэтому предлагается расчетное значение коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования K_{0} определять как величину, отнесенную к режиму идеального холостого хода объекта регулирования, т. е. без учета изменений коэффициента, обусловленных статизмом нагрузочных характеристик последних элементов системы

$$K_{0} = K_{у} K_{г.о} K_{д.о} K_{о.с} = K_{0}' K_{о.с}. \tag{4}$$

Произведение коэффициентов усиления $K_{у}$, $K_{г.о}$ и $K_{д.о}$ при холостом ходе объекта регулирования представляет расчетное значение коэффициента усиления со входа на выход системы

$$K_{0}' = K_{у} K_{г.о} K_{д.о} = \frac{E_{г}}{C_{е} A W_{у}}. \tag{5}$$

Расчетное значение коэффициента K_{0}' может определяться по характеристике холостого хода каскада ЭМУ — генератор $E_{г} = f(A W_{у})$.

Так как коэффициент усиления обратной связи $K_{о.с}$ при действии системы регулирования остается практически неизменным, определение расчетного значения коэффициента K_{0} на основании выражений (4) и (5) затруднений не вызывает.

Как показано ниже, при использовании расчетного значения коэффициента K_0 значительно упрощаются и все расчетные зависимости точности статического регулирования от параметров системы управления и регулирования.

2. Для установления зависимости точности регулирования от параметров системы рассмотрим физическую сущность процессов статического регулирования на примере системы регулирования скорости двигателя. При этом удобнее воспользоваться системой относительных единиц, а также считать для упрощения характеристики холостого хода ЭМУ и генератора прямолинейными, т. е. расчетное значение коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования постоянным.

Номинальным значением регулируемого параметра на выходе системы условимся считать заданную скорость идеального холостого хода двигателя $n_{д.\,о}$. Под номинальными значениями результирующих ампервитков возбуждения ЭМУ $AW_{у.\,о}$, э. д. с. электромашинного усилителя $E_{у.\,о}$, э. д. с. генератора $E_{г.\,о}$ и э. д. с. двигателя $E_{д.\,о}$ будем понимать их значения, которые необходимы для обеспечения номинальной величины скорости. Под номинальным значением тока двигателя $I_{я.\,н}$ будем понимать его паспортное значение, под номинальным сопротивлением якоря двигателя $R_{я.\,н}$ — отношение

$$R_{я.\,н} = \frac{E_{д.\,о}}{I_{я.\,н}}.$$

Как известно, основным элементом системы регулирования является замыкающая систему отрицательная обратная связь, передающая на вход системы регулирующее воздействие — величину, пропорциональную значению регулируемого параметра.

Рассмотрим уравнение, связывающее выход и вход системы регулирования,

$$AW_{о.\,с} = K_{о.\,с}\, n_д = K_{о.\,с}\frac{E_д}{C_e} = K_{о.\,с}\frac{1}{C_e}(E_г - I_я R_я). \qquad (6)$$

Представим последнее выражение в относительных единицах, для чего разделим обе части равенства на $n_{д.\,о}$, учитывая, что

$$n_{д.\,о} = K_0' AW_{у.\,о}; \quad n_{д.\,о} = \frac{E_{д.\,о}}{C_e} = \frac{E_{г.\,о}}{C_e}; \quad n_{д.\,о} = \frac{I_{я.\,н}R_{я.\,н}}{C_e};$$

$$\frac{AW_{о.\,с}}{K_0' AW_{у.\,о}} = K_{о.\,с}\frac{1}{C_e}\left(\frac{E_г}{E_{г.\,о}} - \frac{I_я R_я}{I_{я.\,н}R_{я.\,н}}\right)C_e;$$

$$\frac{AW_{о.\,с}}{AW_{у.\,о}} = K_{о.\,с}K_0'\left(\frac{E_г}{E_{г.\,о}} - \frac{I_я R_я}{I_{я.\,н}R_{я.\,н}}\right);$$

$$aw_{о.\,с} = K_{о.\,с}K_0'(e_г - ri), \qquad (7)$$

где $aw_{о.\,с}$ — ампервитки регулирующей обмотки;

$e_г$ — э. д. с. генератора;

r и i — сопротивление и ток главной якорной цепи (все в относительных единицах).

Как следует из уравнения (7), коэффициент усиления разомкнутой цепи регулирования K_0 показывает приращение ампервитков обмотки регулирующей обратной связи в относительных единицах при

изменении регулируемого параметра (скорости) на одну относительную единицу.

Так как ампервитки задающей обмотки ЭМУ в относительных единицах $aw_{о.з}$ — величина неизменная для каждого положения командо-аппарата управления, очевидно, при отклонении значения регулируемого параметра от заданного относительное изменение ампервитков регулирующей обратной связи будет равно относительному изменению результирующих ампервитков возбуждения ЭМУ. Таким образом, в замкнутой системе регулирования с регулирующей обратной связью, при отклонении значения регулируемого параметра от заданного, относительному изменению выходного воздействия $\delta_{вых}$ соответствует относительное изменение входного воздействия $\delta_{вх}$, увеличенное в K_0 раз

$$\delta_{вх} = K_0 \delta_{вых}. \tag{8}$$

Уравнение (8) отражает основное свойство замкнутой системы автоматического регулирования — *свойство усиления на входе системы относительных изменений выходного воздействия,* а также выявляет роль расчетного коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования, как коэффициента усиления относительных изменений, передаваемых с выхода на вход системы

$$K_0 = \frac{\delta_{вх}}{\delta_{вых}}. \tag{9}$$

С физической стороны свойство усиления относительных изменений объясняется наличием на входе системы двух противонаправленных потоков энергии — задающего $A W_{о.з}$ и регулирующего $A W_{о.с}$, превышающих по величине значение результирующего входного воздействия $A W_{у}$, необходимого для обеспечения заданного значения регулируемого параметра.

Термины «свойство усиления относительных изменений», «коэффициент усиления относительных изменений» применительно к системам автоматического регулирования впервые введены в литературу Е. Л. Эттингером [6]. Однако при рассмотрении процессов статического регулирования он исходил из неправильного положения о том, что напряжение на входе системы при холостом ходе равно напряжению на выходе системы. Такое исходное положение привело автора к выводу, что усиление относительных изменений в системе регулирования происходит при передаче воздействия со входа на выход системы, причем коэффициент усиления относительных изменений представляет отношение

$$K = \frac{\delta_{вых}}{\delta_{вх}}.$$

В действительности же при передаче воздействия со входа на выход системы усиления относительных изменений не происходит и коэффициент усиления относительных изменений при этом равен единице. Это следует из уравнения, связывающего вход и выход усилительных звеньев системы (ЭМУ и генератора), если представить его в относительных единицах

$$E_г = K_у K_{г.о} A W_у. \tag{10}$$

Поделив обе части равенства на $E_{г.о}$ и учитывая, что $E_{г.о} = K_у K_{г.о} A W_{у.о}$, получим выражение (10) в относительных единицах

$$e_г = a w_у. \tag{11}$$

Из уравнения (11) видно, что в относительных единицах ампервитки возбуждения ЭМУ равны э. д. с. генератора, т. е. коэффициент усиления относительных изменений при передаче воздействия со входа на выход системы равен единице.

Таким образом, в замкнутой системе авторегулирования с отрицательной обратной связью усиление относительных изменений имеет место только при передаче воздействия с выхода на вход системы.

Благодаря указанному свойству, в установившихся режимах относительное изменение значения регулируемого параметра в замкнутой системе $\delta_з$, вызванное изменением величины задающего входного воздействия $A W_{о.з}$ или действием в системе внешних причин (возмущающих факторов), уменьшается в $1 + K_0$ раз по сравнению с относительным изменением регулируемого параметра в разомкнутой системе $\delta_р$

$$\delta_з\% = \frac{\delta_р}{1 + K_0}\ \%. \tag{12}$$

Действительно, предположим, что под действием какого-либо возмущающего фактора значение регулируемого параметра в разомкнутой системе изменяется на величину $\delta_р\%$. В замкнутой системе при том же значении возмущающего фактора изменение регулируемого параметра составит $\delta_з\%$, что, в свою очередь, вызовет изменение входного воздействия на $K_0\delta_з\%$. Так как коэффициент усиления относительных изменений со входа на выход системы равен единице, то при изменении входного воздействия на $K_0\delta_з\%$ соответственное изменение на $K_0\delta_з\%$ получает значение регулируемого параметра.

В установившемся режиме, очевидно, относительное изменение значения регулируемого параметра на выходе системы $\delta_з\%$ определяется действием на параметр возмущающего фактора, вызывающего относительное изменение параметра на $\delta_р\%$, и компенсирующим действием системы регулирования, вызывающим относительное изменение регулируемого параметра на $K_0\delta_з\%$, т. е.

$$\delta_з\% = \delta_р\% - K_0\delta_з\%, \tag{13}$$

откуда непосредственно следует выражение

$$\delta_з\% = \frac{\delta_р}{1 + K_0}\ \%.$$

3. При действии в системе фактора нагрузки выражение для точности регулирования дается обычно через статизм нагрузочных характеристик системы S

$$\delta_з = \alpha S, \tag{14}$$

где α — коэффициент загрузки.

Нагрузочные характеристики электромеханической системы обычно совпадают с нагрузочными характеристиками объекта регулирования $n_д = f(I_я)$ или $U_г = f(I_я)$. Соответственно, под статизмом системы понимается относительное изменение значения регулируемого параметра

при изменении нагрузки от нуля до номинального значения. Например, для системы регулирования скорости двигателя

$$S = \frac{n_{д.\,о} - n_{д.\,н}}{n_{д.\,о}}, \tag{15}$$

где $n_{д.\,о}$ — скорость идеального холостого хода двигателя при $I_я = 0$;
$n_{д.\,н}$ — скорость двигателя при номинальной нагрузке при $I_я = I_{я.\,н}$.

Выражение для статизма замкнутой электромеханической системы через параметры системы следует из общего уравнения (12).

Действительно, относительное изменение значения регулируемого параметра в разомкнутой системе $\delta_р$ при действии фактора нагрузки $I_я$ может быть представлено

$$\delta_р = \frac{\Delta n_д}{n_{д.\,о}} = \frac{\frac{I_я R_я}{C_е}}{\frac{I_{я.\,н} R_{я.\,н}}{C_е}} = ri, \tag{16}$$

где r, i — сопротивление и ток главной якорной цепи — относительные единицы.

Для замкнутой системы справедливо соотношение

$$\delta_з = \frac{\delta_р}{1 + K_0} = \frac{r}{1 + K_0} i, \tag{17}$$

где коэффициент при i, очевидно, представляет статизм нагрузочных характеристик системы S, т. е.

$$S = \frac{r}{1 + K_0}. \tag{18}$$

Полученное выражение для статизма замкнутой электромеханической системы (18) значительно отличается от выражения, часто встречающегося в технической литературе [2, 3, 4, 5]

$$S = \frac{1}{1 + K_0}. \tag{19}$$

Применительно к электромеханическим системам зависимость (19) не отражает физики процесса регулирования и приводит к неверным результатам, так как она неправильно учитывает свойство положительного саморегулирования электрических машин, являющихся обычно регулируемыми объектами в электромеханических системах.

Зависимость (18) справедлива для механизмов с мягкой нагрузочной характеристикой (рис. 2), в чем легко убедиться, применив ее для разомкнутой системы $K = 0$.

Вывод этой формулы, например, М. В. Мееровым [3], основан на неверном положении о том, что эталонное (задающее) напряжение на входе системы равно напряжению на выходе при холостом ходе.

Неправильность формулы (19) отмечена С. Ф. Березниковским [1], но критический анализ формулы проведен недостаточно обстоятельно. Автор не выясняет, что основной причиной непригодности формулы (19) применительно к электромеханическим системам является то, что она

неправильно отражает основное свойство электрической машины — свойство положительного саморегулирования.

В работе С. Ф. Березниковского применительно к системе регулирования напряжения генератора предлагается выражение для статизма замкнутой системы через коэффициенты усиления со входа на выход системы при холостом ходе K_0 и нагрузке $K_н'$

$$S = \frac{1 - \frac{K_н'}{K_0'}}{1 + \gamma K_н'}. \qquad (20)$$

Зависимость (20), полученная преобразованием выражения для статизма $S = \frac{U_{г.о} - U_{г.н}}{U_{г.о}}$, хотя и правильна, для практического пользования неудобна, так как входящий в формулу коэффициент

$$K_н' = \frac{U_{г.н}}{AW_у}$$

является по существу таким же неизвестным, как и искомая величина статизма S.

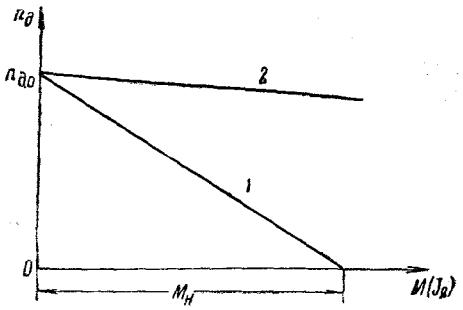


Рис. 2. Нагрузочные характеристики объектов регулирования:

1 — со статизмом, равным 1; *2* — электрической машины

Необходимо отметить также, что выражение для статизма через коэффициенты усиления электрических машин не способствует ясности анализа физической сущности процесса регулирования. Примером этому являются выводы С. Ф. Березниковского о возможности получения астатического регулирования в системах с отрицательной регулирующей обратной связью и необходимости увеличения значения коэффициента усиления при нагрузке $K_н'$ для уменьшения статизма системы S.

Достоинствами предлагаемой формулы (18) является то, что она выводится как частный случай общего выражения для точности регулирования (12), отражающего основное свойство системы регулирования. Формула проста и практически удобна, так как все величины, входящие в нее, определяются весьма просто. Формула очень наглядна с точки зрения изображения нагрузочных характеристик системы. Например, для привода системы Г-Д наклон электромеханических характеристик $n_д = f(I_я)$ определяется величиной сопротивления якорной цепи r, в замкнутой системе наклон характеристик $n_д = f(I_я)$ уменьшается в $1 + K_0$ раз.

4. Рассмотрение статики процессов в замкнутой системе с регулирующей обратной связью позволяет считать, что основным параметром, определяющим регулировочные свойства системы, является коэффициент усиления относительных изменений, численно равный коэффициенту усиления разомкнутой цепи регулирования, отнесенному к режиму холостого хода объекта регулирования.

Расчетное значение этого коэффициента, необходимое для обеспечения заданной точности регулирования, может определяться на основании выражений (12) и (18).

При выводе основных зависимостей (12) и (18) предполагалось, что характеристики холостого хода усилительных элементов системы

(ЭМУ и генератора) прямолинейны, т. е. величина коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования K_0 постоянна. В действительности, при действии системы регулирования, вследствие изменения нагрузки и криволинейности характеристик этих элементов, величина коэффициента усиления со входа на выход системы K_0', соответственно и коэффициента K_0, изменяется.

Однако при заданном значении регулируемого параметра и известном в первом приближении [на основании формул (12) или (18)] действительном его значении, т. е. при известных ампервитках регулирующей обмотки ЭМУ $AW_{0.c}$, результирующие ампервитки возбуждения ЭМУ AW_y могут быть найдены на основании выражения $AW_y = AW_{0.з} - AW_{0.c}$. Расчетное значение коэффициентов усиления K_0' и K_0 может быть уточнено непосредственно по характеристике холостого хода каскада ЭМУ — генератор $E_г = f(AW_y)$.

Уточненное значение расчетного коэффициента K_0 при повторной подстановке в выражение (12) или (18) дает более точные, обычно достаточные для целей инженерной практики, результаты.

При выбранных основных электрических машинах привода, т. е. при вполне определенном значении коэффициента усиления со входа на выход K_0', необходимое значение коэффициента K_0 обеспечивается изменением параметров цепи регулирующей обратной связи (напряжением измерительного элемента и сопротивления этой цепи), т. е. изменением величины коэффициента усиления обратной связи $K_{0.c}$.

При расчетах точности статического регулирования необходимо учитывать, что величина коэффициента усиления разомкнутой цепи регулирования K, определяя точность регулирования в установившихся режимах, оказывает большое влияние на динамику переходных процессов в системе.

Поэтому выбор величины этого коэффициента может производиться только на основании комплексного анализа статических и динамических свойств системы.

Выводы

1. Основным свойством замкнутой системы автоматического регулирования является свойство усиления относительных изменений регулируемого параметра при передаче их регулирующей обратной связью с выхода на вход системы [формула (8)].

2. Коэффициент усиления относительных изменений [формула (9)] численно равен коэффициенту усиления разомкнутой цепи регулирования, отнесенному к режиму холостого хода объекта регулирования [формула (4)].

3. Благодаря свойству усиления относительных изменений, изменение регулируемого параметра в замкнутой системе, вызванное изменением задающего воздействия или действием в системе возмущающих факторов, уменьшается в $1 + K_0$ раз по сравнению с изменением регулируемого параметра в разомкнутой системе [формула (12)].

4. Часто встречающееся в литературе выражение для статизма [формула (19)] применительно к системам с электрическими машинами непригодно, так как неправильно отражает свойство положительного саморегулирования электрических машин.

5. При расчете точности статического регулирования в замкнутых электромеханических системах можно пользоваться зависимостями (12), (18), учитывающими основные свойства электрических машин, действие возмущающих факторов и действие системы регулирования.

Использованная литература

1. Березниковский С. Ф. О статизме, точности регулирования и коэффициенте усиления систем с электрическими машинами. Вестник электропромышленности, 1954 № 2.

2. Лернер А. Я. и Розенман Е. А. Наладка промышленных автоматизированных электроприводов. Госэнергоиздат, 1950.

3. Мееров М. В. Основы автоматического регулирования электрических машин. Госэнергоиздат, 1952.

4. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. Госэнергоиздат, 1950.

5. Челюсткин А. В. и Розенман Е. А. Автоматическое управление прокатными станами. Металлургиздат, 1950.

6. Эттингер Е. Л. Метод относительных единиц в применении к расчету точности регулирования статических систем в установившемся режиме. «Электричество», 1950, № 11.