

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Тимошенко А.В., Пушкин А.А.

Донбаська державна машинобудівна академія

ann_timka@mail.ru

С наступлением 21 века, в связи с увеличением объема потребляемой энергии, усложнением требований технологического процесса и рядом других причин, возникла необходимость более полного учета взаимодействия электропривода с приводными механизмами, содержащими упругие связи с целью уменьшения колебательности.

Подавление упругих колебаний, возникающих в электроприводах при пуске и ударных нагрузках, приведет к:

- существенному увеличению срока службы передаточных устройств;
- снижению динамических нагрузок и, как следствие, к уменьшению потребления энергии на бесполезные колебательные движения;
- уменьшению тепловых нагрузок двигателя и управляемого преобразователя;
- дополнительному эффекту повышения точности регулирования и строгого выполнения требования технологического процесса, что, несомненно, будет способствовать выпуску продукции более высокого качества.

Отметим тот факт, что стандартные настройки электропривода не обеспечивают рационального (оптимального) демпфирования колебаний. Логарифмический декремент затухания λ , который является прямой оценкой колебательности электропривода, слишком мал, чтобы удовлетворить требования технологического процесса. В связи с этим стоит актуальная проблема повышения λ , с целью максимального демпфирования упругих механических колебаний.

На современном этапе, наиболее перспективным и рациональным способом подавления упругих колебаний является электротехнический, так как он прост в осуществлении, легко может использоваться для автоматизации любой электромеханической системы.

В [1] рассматриваются условия предельного демпфирования электрической подсистемой упругих механических колебаний в двухмассовой ЭМС и качество переходных процессов в ней на основе классического метода.

Обобщенные оценки влияния упругих звеньев механической передачи на качество линейных унифицированных автоматических систем регулирования приведены в [2].

Целью работы является определение оптимальных соотношений параметров электрической подсистемы, с целью достижения минимума колебательности.

Одним из наиболее распространенных принципов построения систем автоматического управления электроприводов является принцип подчиненного регулирования. Структурная схема системы подчиненного регулирования приведена на рисунок 1.

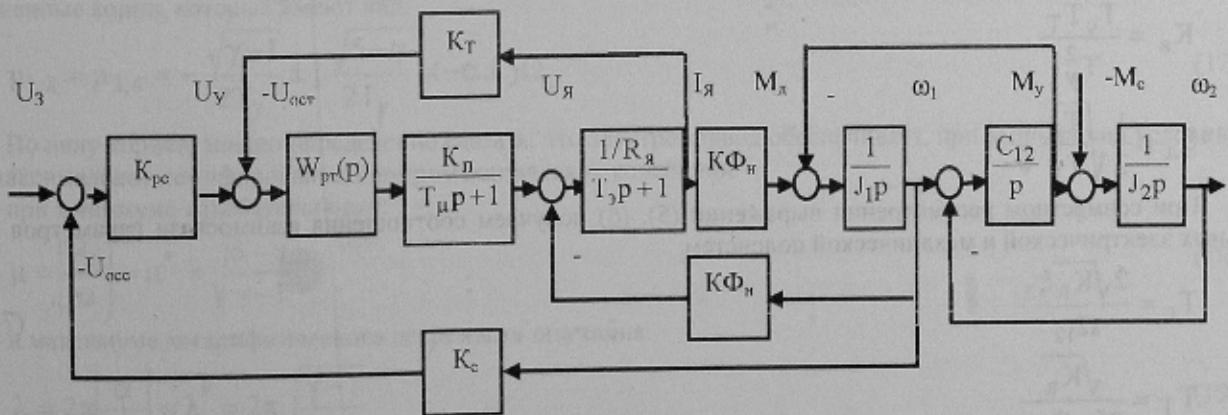


Рисунок 1 – Структурная схема системы подчиненного регулирования с упругими связями

Передаточная функция по управляющему воздействию имеют следующий вид:

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{U_3(p)} = \frac{D(p)}{Q(p)} = \frac{K_{pc}(1/K_T)}{\frac{\gamma T_c T_T}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \left(T_c T_T + \frac{K_{pc}(1/K_T)K_c}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \gamma T_c p + K_{pc}(1/K_T)K_c} \quad (1)$$

где $W(p)$ – передаточные функции по управляющему воздействию; ω_2 – скорость механизма; U_3 – напряжения задания; γ – коэффициент распределения инерционных масс; Ω_{12} – частота свободных колебаний; T_c – некомпенсированная постоянная времени контура регулирования скорости; T_T – некомпенсированная постоянная времени контура регулирования тока; K_T – коэффициент обратной связи по току; K_c – коэффициент обратной связи по скорости; K_{pc} – коэффициент регулятора скорости.

Обращаем внимание на знаменатель передаточной функции – характеристическое уравнение, которое определяет демпфирующие свойства электропривода:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_c T_T}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \left(T_c T_T + \frac{K_{pc}(1/K_T)K_c}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \gamma T_c p + K_{pc}(1/K_T)K_c = 0 \quad (2)$$

Из характеристического уравнения следует, что характер переходных процессов определяется параметрами: $\gamma, \Omega_{12}, T_c, T_T, K_{pc}, K_c, K_T$.

Одним из вариантов оптимизации является изменение коэффициента распределения инерционных масс γ или частота свободных колебаний Ω_{12} за счет выбора передаточного числа редуктора и номинальной скорости электродвигателя, а также значений моментов инерции элементов привода. Выбор конструктором величины дискретных масс привода ограничивается определенными (каталожными) значениями моментов инерции роторов двигателей, редукторов, муфт, шкивов и т.д. [3], поэтому наиболее эффективно и проще воздействовать на параметры электрической подсистемы: $T_c, T_T, K_{pc}, K_c, K_T$. На основании этого, первостепенной задачей является определение соотношения:

1. Коэффициентов регуляторов и обратных связей.
2. Некомпенсированных постоянных времени.

Для дальнейшего упрощения анализа характеристического уравнения, с целью определения оптимальных постоянных времени: T_c, T_T принимаем:

$$K_{pc} = K_{pc}^* = \frac{1}{(1/K_T)K_c} \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) принимает удобный для анализа вид:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_c T_T}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \left(T_c T_T + \frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \gamma T_c p + 1 = 0 \quad (4)$$

Для определения оптимальных некомпенсированных постоянных времени воспользуемся обобщенными параметрами [4]:

- 1) K_B – коэффициент электромеханического взаимодействия;
- 2) ξ_d – коэффициент демпфирования.

Применительно к рассматриваемой структурной схеме, их можно выразить как:

$$K_B = \frac{T_c T_T}{T_y^2} \quad (5)$$

$$\xi_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_c}{T_T}} \quad (6)$$

При совместном рассмотрении выражений (5), (6) получаем соотношения взаимосвязи параметров отдельных электрической и механической подсистем:

$$T_c = \frac{2\sqrt{K_B} \xi_d}{\Omega_{12}} \quad (7)$$

$$T_T = \frac{\sqrt{K_B}}{2\xi_d \Omega_{12}} \quad (8)$$

После подстановки соотношений для обобщенных параметров в характеристическое уравнение (4) получаем его в нормированном виде:

$$Q(p) = \gamma \cdot K_B \cdot T_y^4 \cdot p^4 + 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{K_B} \cdot \xi_d \cdot T_y^3 \cdot p^3 + \gamma \cdot (1 + K_B) \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{K_B} \cdot \xi_d \cdot T_y \cdot p + 1 = 0 \quad (9)$$

где $T_y = 1/\Omega_{12}$ – постоянная времени упругих колебаний;

Максимальное демпфирование в электроприводе достигается при электромеханическом взаимодействии и полной идентичности колебаний в электрической и механической подсистемах, т.е. когда будет выбрано такое сочетание обобщенных параметров, при которых корни характеристического уравнения (9) станут кратными.

На основе этого, свободное движение ЭМС представляем уравнением вида:

$$Q_1(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_{\Sigma} T_y p + 1) \cdot (T_y^2 p^2 + 2\xi_M T_y p + 1), \quad (10)$$

Раскрыв скобки получим:

$$Q_1(p) = T_y^4 p^4 + 2T_y^3 (\xi_M + \xi_{\Sigma}) p^3 + T_y^2 (2 + 4\xi_M \xi_{\Sigma}) p^2 + 2T_y (\xi_M + \xi_{\Sigma}) p + 1, \quad (11)$$

где ξ_{Σ} , ξ_M – коэффициенты демпфирования колебаний в электрической и механической подсистемах соответственно.

При совместном решении уравнений (10) и (11) получаем следующие соотношения:

$$\begin{cases} \gamma \cdot K_B \cdot T_y^4 = T_y^4 \\ 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{K_B} \cdot \xi_d \cdot T_y^3 = 2 \cdot (\xi_M + \xi_{\Sigma}) \cdot T_y^3 \end{cases} \quad \begin{cases} \gamma \cdot (1 + K_B) \cdot T_y^2 = (2 + 4\xi_M \xi_{\Sigma}) \cdot T_y^2 \\ 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{K_B} \cdot \xi_d \cdot T_y = 2 \cdot (\xi_M + \xi_{\Sigma}) \cdot T_y \end{cases} \quad (12)$$

Тождественность данных соотношений выполняется при условиях:

$$\begin{cases} K_B = 1/\gamma, \quad \xi_d \cdot \sqrt{\gamma} = \xi_M + \xi_{\Sigma}; \quad 4 \cdot \xi_M \cdot \xi_{\Sigma} = \gamma - 1 \end{cases} \quad (13)$$

Подстановка $\xi_{\Sigma} = \xi_M$ дает нам соотношения для обобщенных параметров при предельном демпфировании:

$$\begin{cases} K_B^* = 1/\gamma \\ \xi_d^* = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \end{cases} \quad (14)$$

При выполнении данных условий достигается предельное значение демпфирования колебаний в ЭМС.

Из выражения (13) следует, что в ЭМС обеспечивается предельное демпфирование упругих колебаний в электрической и механической подсистемах с максимально возможным значением коэффициента демпфирования:

$$\xi^* = \xi_{\Sigma} = \xi_M = \frac{\sqrt{\gamma-1}}{2} \quad (15)$$

Для определения оптимальных показателей работы электромеханической системы, с целью исследования эффекта демпфирования упругих колебаний, преобразуем характеристическое уравнение (10), при учете выражения (15), в форме:

$$Q(p) = (T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma-1} T_y p + 1) (T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma-1} T_y p + 1) \quad (16)$$

Приравняв уравнение (18) к нулю и решив его – получим кратные (одинаковые) комплексно-сопряженные корни, которые имеют вид:

$$p_{1,2} = p_{3,4} = -\frac{\sqrt{\gamma-1}}{2T_y} \pm j \frac{\sqrt{5-\gamma}}{2T_y} = -\alpha \pm j\Omega_p \quad (17)$$

По виду корней, можно определенно сказать, что электропривод обеспечивает, при выполнении условий (14), максимальное демпфирование электромеханических колебаний

при минимуме колебательности:

$$\mu = \left| \frac{\Omega_p}{\alpha} \right| = \mu^* = \sqrt{\frac{5-\gamma}{\gamma-1}} \quad (18)$$

и максимуме логарифмического декремента затухания:

$$\lambda = 2\pi \left| \frac{\alpha}{\Omega_p} \right| = \lambda^* = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma-1}{5-\gamma}} \quad (19)$$

Перейдем от обобщенных параметров к оптимальным постоянным времени электрической части привода:

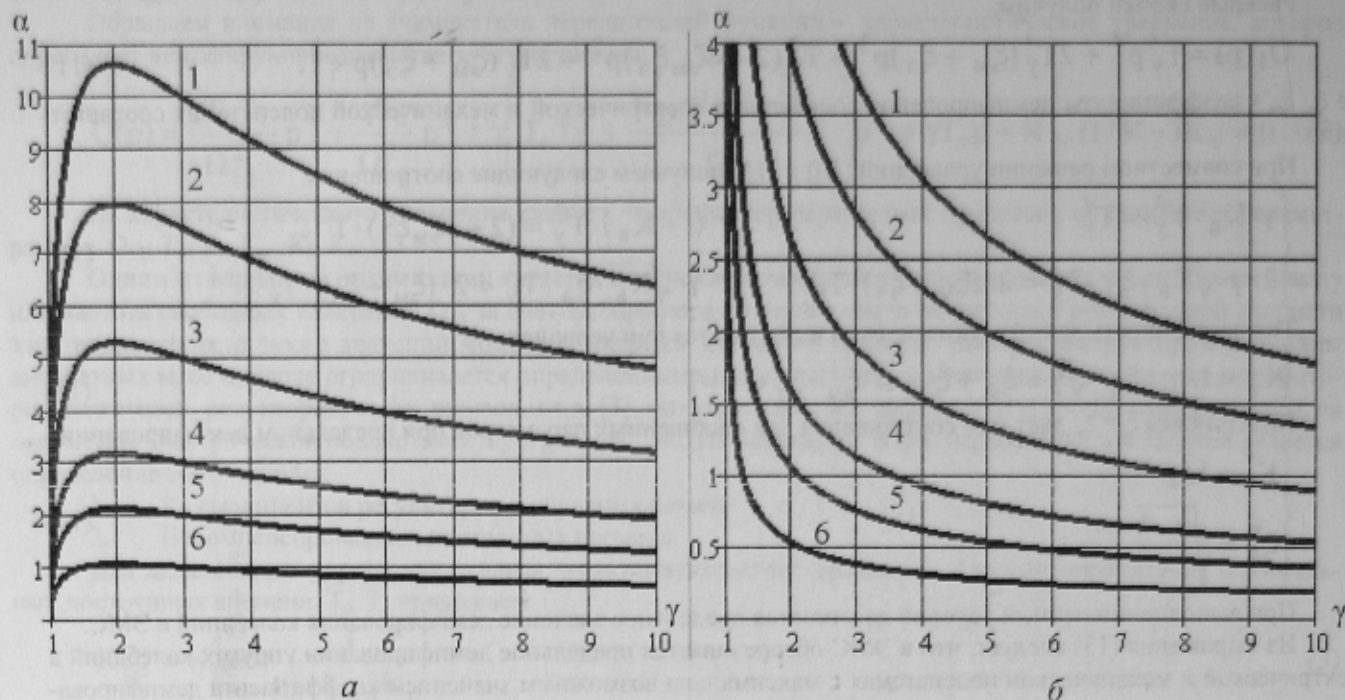
$$T_T^* = \sqrt{K_B^*} \cdot \frac{T_y}{2\xi_{\text{д}}^*} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\gamma-1} \cdot \Omega_{12}} \quad (20)$$

$$T_C^* = 2 \cdot \sqrt{K_B^*} \cdot \xi_{\text{д}}^* \cdot T_y = \frac{2 \cdot \sqrt{\gamma-1}}{\gamma \cdot \Omega_{12}} \quad (21)$$

Согласно модульному оптимуму, некомпенсированные постоянные времени контуров тока и скорости определяются: $T_T = \alpha_1 T_{\text{пр}}$, $T_C = \alpha_2 T_{\text{пр}}$, где $\alpha_1=2$, $\alpha_2=4$. Однако данные значения α_1 и α_2 не являются оптимальными для разного рода механизмов и в соответствии с уравнениями (20) и (21) однозначно зависят от:

1. γ – коэффициент распределения инерционных масс;
2. Ω_{12} – частота свободных колебаний.

Графические иллюстрации изменения α_1 и α_2 в зависимости от изменения γ и Ω_{12} приведены на рис. 2.



1 - $\Omega_{12}=18,85 \text{ с}^{-1}$; 2 - $\Omega_{12}=25,13 \text{ с}^{-1}$; 3 - $\Omega_{12}=37,7 \text{ с}^{-1}$; 4 - $\Omega_{12}=62,83 \text{ с}^{-1}$; 5 - $\Omega_{12}=125,66 \text{ с}^{-1}$;
6 - $\Omega_{12}=188,5 \text{ с}^{-1}$

Рисунок 2 – Графические зависимости α_1 и α_2 от γ

Из графических зависимостей можно сделать ряд выводов:

1. Для каждого отдельно взятого механизма существуют собственные соотношения частот свободных колебаний и коэффициента распределенных масс в зависимости от которых можно подобрать оптимальные значения некомпенсированных постоянных времени.

2. Оптимальные значения коэффициентов α_1 , α_2 при вариации Ω_{12} и γ - значительно отличаются от тех, которые задаются согласно модульному оптимуму.

3. При достаточно высокой частоте свободных колебаний Ω_{12} , коэффициенты α_1 и α_2 практически не изменяются.

На рисунке 3 приводится графическая интерпретация результатов исследования и полученных оптимальных значений $K_{\text{pc}}^{\text{opt}}$ (3) и λ^{opt} (19), при учете соотношений (20), (21). С использованием метода численного решения характеристического уравнения (9) найдены корни при варьировании параметров и построена зависимость $\lambda=f(K_{\text{pc}})$. При увеличении K_{pc} от нуля логарифмический декремент возрастает, достигает максимума λ^{opt} (19), а затем при дальнейшем увеличении уменьшается практически до нуля, при этом каждому значению γ соответствует один максимум, который наступает при $K_{\text{pc}}=K_{\text{pc}}^{\text{opt}}$ (3). В результате получаем такие значения:

- 1) $\gamma=1.1$; $\alpha_1=1,22 \text{ с}$; $\alpha_2=3,36 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=1.006$
- 2) $\gamma=1.2$; $\alpha_1=1,58 \text{ с}$; $\alpha_2=2,37 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=1.441$
- 3) $\gamma=1.5$; $\alpha_1=2 \text{ с}$; $\alpha_2=1,5 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=2.374$
- 4) $\gamma=2$; $\alpha_1=2,12 \text{ с}$; $\alpha_2=1,06 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=3.627$
- 5) $\gamma=3$; $\alpha_1=2 \text{ с}$; $\alpha_2=0,75 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=6.282$
- 6) $\gamma=4$; $\alpha_1=1,84 \text{ с}$; $\alpha_2=0,61 \text{ с}$; $\lambda_{\text{max}}=10.881$.

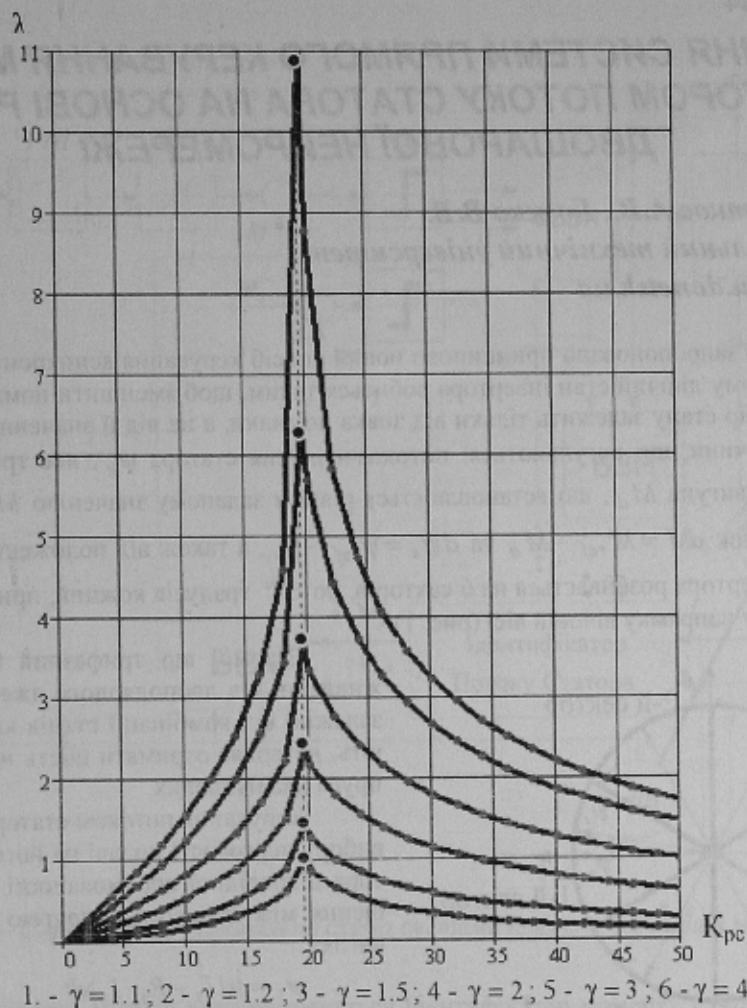


Рисунок 3 – Графическая интерпретация результатов исследования

Из рис.3 видно, что предельное демпфирование колебаний в системе подчиненного регулирования тем выше, чем выше коэффициент распределения инерционных масс γ .

Выводы:

Определены оптимальные соотношения параметров электрической подсистемы, с целью достижения минимума колебательности:

1.
$$K_{pc} = K_{pc}^* = \frac{1}{(1/K_T)K_c}$$
2.
$$T_T^* = \sqrt{K_v^{opt}} \cdot \frac{T_y}{2\xi_d^{opt}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\gamma-1} \cdot \Omega_{12}}$$
3.
$$T_c^* = 2 \cdot \sqrt{K_v^{opt}} \cdot \xi_d^{opt} \cdot T_y = \frac{2 \cdot \sqrt{\gamma-1}}{\gamma \cdot \Omega_{12}}$$

Подтверждены результаты исследования на основе графических зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Земляков В.Д. Оптимизация параметров систем подчиненного регулирования электроприводов с упругим механическим звеном/ В.Д. Земляков, Н.А. Задорожний// Электричество.-М., 1984. – 5. – С.49 – 52.
2. Борцов Ю.А. Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими звеньями. Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
3. Иванченко Ф.К. Механика привода технологических машин. – Киев: Выща школа, 1986. – 152 с.
4. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний. – Изв.вузов. Электромеханика, 1984. - № 5. – С.92 – 98.