

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганков В.М., Пашенко А.В., Вериго А.Р. Использование регрессионных моделей для оценки потерь энергии в питающих сетях энергосистемы // Изв. вузов. Энергетика. – 1986. – № 12. – С. 15–17. 2. Методика, алгоритм и программа расчета установившегося режима электрической сети на ЭВМ типа 1030: Науч.-техн. отчет. – М.: ВНИИЭ ВЦ ГТУ (ОЛР), 1980. – 150 с.

УДК 621.314:621.316.718

И.А. ФЕДОРОВА, А.П. КУЗНЕЦОВ

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ИМПУЛЬСНОМ УПРАВЛЕНИИ

Рассмотрена система регулирования скоростью двигателя постоянного тока при управлении комбинированной амплитудно-импульсной, широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией (АИМ-ШИМ-ЧИМ), что позволяет расширить диапазон регулирования двигателем. При этом энергетические характеристики привода в силу дискретности управления остаются неизменными.

Разностное уравнение динамики электродвигателя постоянного тока при управлении АИМ-ШИМ-ЧИМ, согласно [1], имеет вид

$$\Omega_{n+1} = \Omega_n e^{-T_n/T_1} + k_u h_n (e^{\tau_n/T_1} - 1) e^{-T_n/T_1} - k_M M_n (1 - e^{-T_n/T_1}), \quad (1)$$

где Ω_{n+1} – значение скорости вращения двигателя через период; Ω_n , M_n , h_n , τ_n – соответственно скорость, момент нагрузки двигателя, амплитуда импульса управления и его ширина на n -м периоде регулирования T_n ; T_1 – электрохимическая постоянная времени двигателя; k_u , k_M – соответственно коэффициенты передачи по напряжению и моменту.

Положим, что ШИМ осуществляется при $aT < \tau_n < bT$, где a и b некоторые постоянные: $a, b \in [0, 1]$; $a < b$. Закон ШИМ определяется неравенствами

$$\tau_n = \begin{cases} aT = \tau_1 & \text{при } k_T \epsilon_n \leq aT; \\ k_T \epsilon_n & \text{при } aT < k_T \epsilon_n < bT; \\ bT = \tau_2 & \text{при } k_T \epsilon_n \geq bT, \end{cases} \quad (2)$$

здесь k_T – коэффициент передачи комбинированного модулятора по длительности; ϵ_n – ошибка рассогласования на n -м интервале регулирования: $\epsilon_n = \omega_n - k_{oc} \Omega_n$; ω_n – сигнал задатчика скорости на n -м интервале регулирования; k_{oc} – коэффициент передачи цепи обратной связи.

С целью увеличения диапазона регулирования при выполнении неравенства $k_T \epsilon_n \geq bT$ в системе введено амплитудно-импульсное регулирование, а при $k_T \epsilon_n \leq aT$ осуществляется регулирование за счет увеличения периода (ЧИМ). Законы АИМ и ЧИМ задаются выражениями:

$$h_n = \begin{cases} h & \text{при } k_T \epsilon_n < bT; \\ k_h \epsilon_n & \text{при } k_T \epsilon_n \geq bT, \end{cases} \quad (3)$$

$$T_n = \begin{cases} T' & \text{при } k_T \epsilon_n \leq 0; \\ T' - k_T \epsilon_n & \text{при } 0 < k_T \epsilon_n \leq aT; \\ T & \text{при } k_T \epsilon_n > aT. \end{cases} \quad (4)$$

При заданном коэффициенте k_T передачи импульсного модулятора по длительности коэффициенты передачи по амплитуде и периоду получаются из (2) – (4):

$$k_h = hk_T / (bT); \quad k_T = ((T'/T) - 1) k_T / a. \quad (5)$$

Координата установившегося режима системы $\Omega_n = \Omega_{n+1} = \Omega^* = \text{const}$ при разных значениях $k_T \epsilon^* = k_T (\omega^* - k_{oc} \Omega^*)$, где $\omega^* = \omega_n = \omega_{n+1} = \text{const}$, определяется выражениями:

при $k_T \epsilon^* \geq bT$

$$\Omega^* = \frac{k_u k_h \omega^* (e^{\tau_2/T_1} - 1) e^{-T/T_1} - k_M M^* (1 - e^{-T/T_1})}{1 - e^{-T/T_1} + k_u k_h k_{oc} (e^{\tau_2/T_1} - 1) e^{-T/T_1}}; \quad (6)$$

при $aT < k_T \epsilon^* < bT$

$$\Omega^* = \frac{k_u h (e^{k_T (\omega^* - k_{oc} \Omega^*) / T_1} - 1) e^{-T/T_1}}{1 - e^{-T/T_1}} - k_M M^*; \quad (7)$$

при $0 < k_T \epsilon^* \leq aT$

$$\Omega^* = \frac{k_u h (e^{\tau_1/T_1} - 1) e^{(T' - k_T (\omega^* - k_{oc} \Omega^*)) / T_1}}{e^{(T' - k_T (\omega^* - k_{oc} \Omega^*)) / T_1} - 1} - k_M M^*; \quad (8)$$

По выражению (6) можно определить значение установившейся скорости Ω^* в случае амплитудно-импульсного управления. Выражения (7) и (8) представляют собой трансцендентные уравнения для определения значения Ω^* соответственно при широтно-импульсном и частотно-импульсном управлениях.

Подставив в (1) $\Omega_n = \Delta \Omega_n + \Omega^*$, с учетом (6) получим линейное уравнение динамики системы в отклонениях $\Delta \Omega_n$ от установившегося режима при АИМ

$$\Delta\Omega_{n+1} = e^{-T/T_1} (1 - k_u k_h k_{oc} (e^{\tau_2/T_1} - 1)) \Delta\Omega_n, \quad (9)$$

условие асимптотической устойчивости которого имеет вид

$$k_1 < \frac{e^{T/T_1} + 1}{e^{\tau_2/T_1} - 1}, \quad (10)$$

где k_1 — коэффициент усиления разомкнутой системы при амплитудно-импульсном управлении: $k_1 = k_u k_h k_{oc}$.

Используя методику, предложенную в [2], находим линеаризованные разностные уравнения привода при ШИМ и ЧИМ:

$$\Delta\Omega_{n+1} = e^{-T/T_1} (1 - k_2 \frac{T}{T_1} e^{\tau^*/T_1}) \Delta\Omega_n, \quad (11)$$

где k_2 — коэффициент усиления разомкнутой системы при широтно-импульсном управлении: $k_2 = k_u k_{oc} k_{ш}$; $k_{ш}$ — коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора: $k_{ш} = k_r h / T$; τ^* — установившееся значение длительности импульса: $\tau^* = k_r (\omega^{ш} - k_{oc} \Omega^*)$:

$$\Delta\Omega_{n+1} = e^{-T^*/T_1} (1 - k_3 \frac{T^*(e^{\tau_1/T_1} - 1)}{T_1 (1 - e^{-T^*/T_1})}) \Delta\Omega_n, \quad (12)$$

где k_3 — коэффициент усиления разомкнутой системы при частотно-импульсном управлении: $k_3 = k_u h k_r k_{oc} / T^*$; T^* — установившееся значение периода квантования: $T^* = T' - k_T \varepsilon^*$.

Условия асимптотической устойчивости в малом при управлениях ШИМ и ЧИМ, полученные из уравнений (11), (12), имеют вид:

$$k_2 < \frac{T_1 (1 + e^{T/T_1})}{T e^{\tau^*/T_1}}; \quad (13)$$

$$k_3 < \frac{T_1 (e^{T^*/T_1} - e^{-T^*/T_1})}{T^* (e^{\tau_1/T_1} - 1)}, \quad (14)$$

Проведем анализ устойчивости при АИМ-ШИМ-ЧИМ управлении. Так как для импульсных систем обычно выполняется соотношение $T/T_1 \ll 1$, то из (9), (10), (13), (14) получаем приближенное ограничение на коэффициенты усиления системы $k_1 < 2T_1/\tau_2$; $k_2 < 2T_1/T$; $k_3 < 2T_1/\tau_1$, т. е. большую область неустойчивости имеет система с ШИМ.

Следует отметить, что полученное условие асимптотической устойчивости в малом для системы с ШИМ при реальных соотношениях параметров T/T_1

получается близким к достаточному асимптотическому условию устойчивости в целом, полученному в [3],

$$k'_2 < (1 + e^{-T/T_1}) T_1/T, \quad (15)$$

а при $\tau^* = 0$ они совпадают. Следовательно, неравенства (13) и (15) являются условиями, близкими к необходимым и достаточным условиям асимптотической устойчивости в целом.

Таким образом, используя неравенства (10), (14), (15), можно с учетом (5) выбирать максимально возможные параметры комбинированного импульсного модулятора k_T , k_h , k_T , обеспечивающие устойчивую работу системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.П., Кузнецов А.П. Динамические модели электродвигателя постоянного тока при дискретном управлении // Науч. и прикл. пробл. энергетики. – Мн.: Выш. шк. – 1975. – Вып. 2. – С. 38–41.
2. К расчету электропривода с широтно-импульсным управлением / В.П. Кузнецов, А.В. Николаев, Я.И. Онацкий, Л.М. Саликов // Изв. вузов. Энергетика. – 1973. – № 6. – С. 127–130.
3. Кузнецов А.П. Исследование устойчивости в целом широтно-импульсной системы стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока // Автоматика и вычислительная техника. – Мн.: Выш. шк., 1979. – Вып. 9. – С. 18–21.