

ЖЕСТКОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Забезпечується можливість визначення зміни жорсткості механічних характеристик АД при частотному регулюванні з різними законами керування аналітичним способом, використовуючи виведену математичну залежність жорсткості від параметрів регулювання, параметрів схеми заміщення та ковзання.

Обеспечивается возможность определения изменения жесткости механических характеристик АД при частотном регулировании с различными законами управления аналитическим способом, используя выведенную математическую зависимость жесткости от параметров регулирования, параметров схемы замещения и скольжения.

The opportunity of definition of change of rigidity of mechanical characteristics the induction motors is provided at frequency regulation with various laws of frequency control by an analytical way, using the derived mathematical dependence of rigidity by parameters of regulation, parameters of an equivalent circuit and rotor slip.

К числу основных эксплуатационных показателей асинхронного двигателя (АД) относится жесткость его механической характеристики, определяемая наклоном касательной в любой рабочей точке механической характеристики и показывающая степень влияния момента нагрузки на изменение частоты вращения двигателя. При частотном управлении требуемые механические характеристики формируются за счет регулируемого по величине и частоте напряжения питания двигателя и их жесткость меняется в диапазоне регулирования частоты вращения.

В наиболее распространенных в настоящее время электроприводах (ЭП) на базе автономных инверторов напряжения (АИН) для обеспечения требуемых характеристик применяются различные законы частотного управления, связывающие значения величины и частоты питающего двигателя напряжения. Зависимости жесткости механических характеристик от частоты вращения двигателя в заданном диапазоне регулирования могут быть найдены графоаналитическим способом по семейству механических характеристик АД, сформированных при частотном управлении. Целесообразно аналитически рассчитывать такие зависимости, используя математическое выражение жесткости, полученное при рассмотрении эквивалентной схемы замещения АД с переменными при частотном управлении параметрами (рис.1). В работах [1,6] приводится математическое выражение жесткости, полученное при анализе упрощенной схемы замещения (при отсутствии активного сопротивления в цепи намагничивания) и для законов частотного управления первой группы, к которой относятся законы

$$U/f = const, U/f^2 = const, U/\sqrt{f} = const.$$

В то же время более эффективными являются законы второй группы,

обеспечивающие постоянство магнитных потоков электрической машины. К их числу относятся законы поддержания постоянства потокосцеплений статора Ψ_1 (или постоянство отношения $E_{внеш}/f$), воздушного зазора Ψ_0 (постоянство E/f), ротора Ψ_2 (постоянство $E_{внут1}/f$). Особенно распространен последний закон, характеризующийся высоким качеством управления электроприводом в статических и динамических режимах. При нем обеспечивается непосредственное управление моментом электродвигателя. Непосредственно регулирование мощности на валу двигателя может быть осуществлено с помощью впервые предлагаемого закона, при котором поддерживается постоянство отношения $E_{внут2}/f$, где $E_{внут2} = E_{внут1} - I_2 r_2$ определяется с учетом падения напряжения на активном сопротивлении ротора.

Целью статьи является вывод математического выражения жесткости при рассмотрении полной схемы замещения и обеспечение возможности анализа изменения жесткости в заданном диапазоне регулирования при различных законах частотного управления.

При частотном управлении все сопротивления, за исключением активных сопротивлений обмоток статора r_1 и ротора r_2' , изменяются пропорционально параметру $\alpha = f_1/f_{1н}$, где f_1 и $f_{1н}$ – текущее и номинальные значения частоты преобразователя, соответственно. Приведенное сопротивление, эквивалентное нагрузке на валу двигателя, зависит от параметра регулирования α и параметра абсолютного скольжения $\beta = f_2/f_{1н} = \alpha s$, где f_2 – частота ротора, s – скольжение двигателя. Приложенное напряжение изменяется пропорционально параметру $\gamma_i = U_1/U_{1н}$, где U_1 и $U_{1н}$ – текущее и номинальные значения напряжения преобразователя. Взаимосвязанное управление напряжением и частотой преобразователя, задаваемое законом частотного управления, при законах первого уровня определяется соотношениями: $\gamma = \alpha$, при $U/f = const$, $\gamma = \alpha^2$ при $U/f^2 = const$ и т. д. [1].

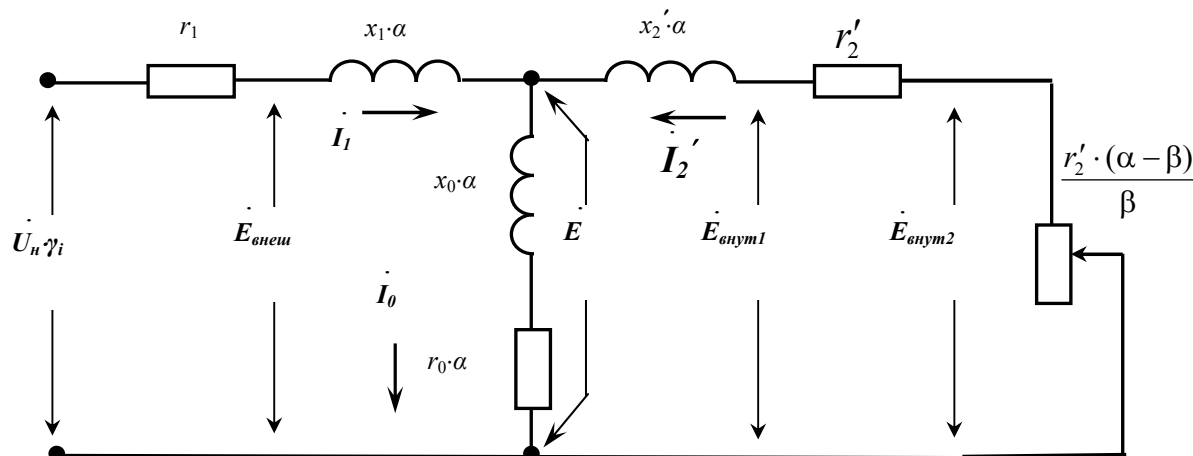


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя с изменяющимися при частотном управлении параметрами

При законах частотного управления второй группы обеспечивается питание двигателя повышенным напряжением с учетом компенсации падения напряжения на различных участках схемы замещения в зависимости от сложности закона. Такое повышение напряжения может быть учтено с помощью коэффициента $\gamma_i = U_{ax}/U_{1н}$, зависящего от параметра γ . В работе [4] рассматривается определение коэффициентов γ_i для всех четырех законов второй группы. Их выражения имеют следующий вид:

$$\gamma_1 = \gamma \sqrt{\frac{\left(\frac{r_0 r_2'}{S} + r_1(r_0 + r_2'/\alpha s) - x_1 \alpha(x_0 + x_2') - x_2' x_0 \alpha\right)^2 + \left(x_1 \alpha(r_0 + r_2'/\alpha s) + \frac{x_0 r_2'}{S} + r_0 x_2' \alpha + r_1(x_0 + x_2')\right)^2}{\left(\frac{r_0 r_2'}{S} - x_1 \alpha(x_0 + x_2') - x_2' x_0 \alpha\right)^2 + \left(x_1 \alpha(r_0 + r_2'/\alpha s) + \frac{x_0 r_2'}{S} + r_0 x_2' \alpha\right)^2}}$$

$$\gamma_2 = \gamma \cdot l, \quad \gamma_3 = \gamma \cdot l \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{x_2' S}{r_2'} \right]^2}, \quad \gamma_4 = \gamma \cdot l \cdot \sqrt{\left[1 + \frac{s}{(1-s)} \right]^2 + \left[\frac{s x_2}{r_2 (1-s)} \right]^2},$$

где

$$l = \sqrt{\frac{\left(\frac{r_0 r_2'}{S} + r_1 (r_0 + r_2' / \alpha s) - x_1 \alpha (x_0 + x_2') - x_2' x_0 \alpha \right)^2 + \left(x_1 \alpha (r_0 + r_2' / \alpha s) + \frac{x_0 r_2'}{S} + r_0 x_2' \alpha + r_1 (x_0 + x_2') \right)^2}{\left(\frac{r_0 r_2'}{S} - x_2' x_0 \alpha \right)^2 + \left(\frac{x_0 r_2'}{S} + r_0 x_2' \alpha \right)^2}}$$

Если известен приведенный ток ротора I_2' , то электромагнитный момент трехфазного

$$p\text{-полюсного асинхронного двигателя определяется как } M = \frac{3 p I_2'^2 r_2'}{2 \pi f \alpha s}.$$

После преобразований получаем
$$M = \frac{3 p U_n^2 \cdot \gamma_i^2 \cdot (1 + d_1^2)}{2 \pi f \cdot (t_1 \frac{\beta}{r_2'} + t_2 \frac{r_2'}{\beta} + t_3)},$$

где
$$t_1 = b^2 + d^2 r_0^2 + 2 \alpha r_0 r_1 \tau_2^2 + \alpha^2 (c^2 + d_1^2 m^2),$$

$$t_2 = d^2 + 2 \alpha d_1 d + \alpha^2 (e_1 + d_1^2),$$

$$t_3 = 2 d^2 r_0 + 2 \alpha r_1 (1 + d_1^2) + 2 \alpha^2 \tau_1 x_1 d_1.$$

Коэффициенты

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_0}, \quad \tau_2 = \frac{x_2'}{x_0}, \quad b = r_1 (1 + \tau_2), \quad c = x_1 + x_2' (1 + \tau_1) = x_2' + x_1 (1 + \tau_2),$$

$$d = \frac{r_1}{x_0}, \quad d_1 = \frac{r_0}{x_0}, \quad e = 1 + \tau_1, \quad m = x_1 + x_2'$$

характеризуют соотношение индуктивных и активных сопротивлений.

Жесткость механических характеристик β_M определяется как

$$\partial M / \partial \omega = \frac{3 p^2 U_n^2 \gamma_i^2 (1 + d_1^2) (t_2 r_2' - \frac{t_1}{r_2'} \beta^2)}{(2 \pi f)^2 \left(\frac{t_1}{r_2'} \beta^2 + t_3 \beta + t_2 r_2' \right)^2}.$$

Или в относительных единицах

$$\beta_M = \frac{(1-s) \cdot (t_2 r_2' - \frac{t_1}{r_2'} s^2)}{\frac{t_1}{r_2'} s^2 + t_3 s + t_2 r_2'}.$$

Математическая модель АД при частотном управлении [2] положена в основу программного продукта “DIMASDrive” [5]. Используя его были проведены расчеты и получены графики изменения жесткости механических характеристик асинхронного двигателя 4A180S2Y3 (см. Рис.2.), который работает в частотном электроприводе при различных законах частотного управления на нагрузку с постоянным моментом $M_{нагр}=60$ Нм в диапазоне регулирования 500 – 2900 об/мин.

Исходя из выполненных исследований следует отметить, что в рассматриваемом электроприводе при использовании закона частотного регулирования $E_{внутр} 2/f = const$ жесткость снизилась на 18% против снижения на 22% при законе $E_{внутр} 1/f = const$ и на 46% при законе

$U/f = const$. Это обстоятельство свидетельствует о преимуществе законов частотного управления второй группы.

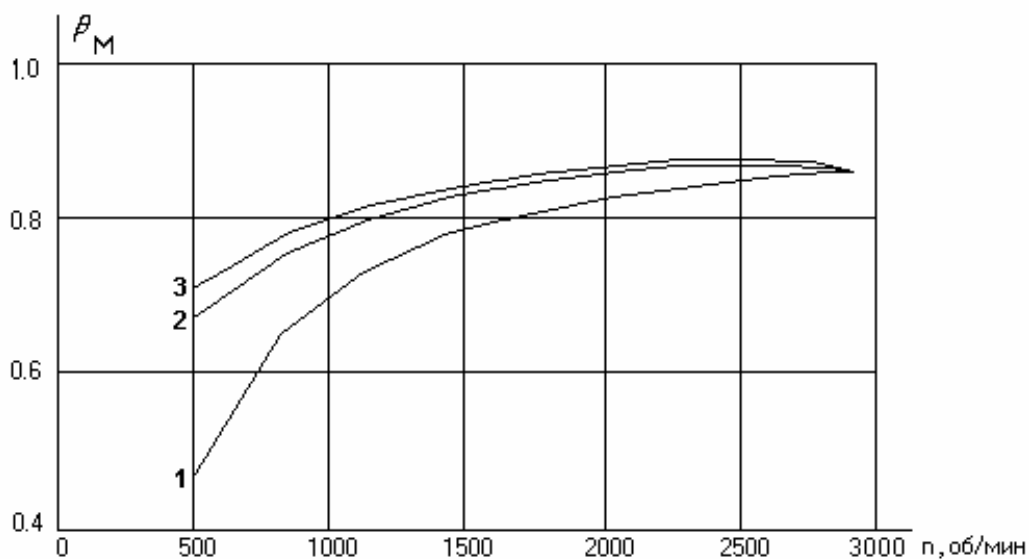


Рис.2. Жесткость механических характеристик АД при частотном регулировании для трёх законов управления:

$$1 - U/f = const, \quad 2 - E_{\text{внутр}1}/f = const, \quad 3 - E_{\text{внутр}2}/f = const$$

Аналогично может быть рассчитано изменение жесткости механических характеристик АД, работающих в частотных электроприводах с разнообразными законами управления на различные по величине и характеру нагрузки, с различными диапазонами регулирования.

Список использованной литературы

1. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электроприводами. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
2. Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. математическая модель асинхронного двигателя при частотном регулировании // Техническая электродинамика. Спец. Вып. – 1998. – С. 31 – 35.
3. Петрушин В.С., Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Электромашинобуд. та электрообладн. – 2001. – Вип. 56. – С. 51 – 54.
4. Петрушин В.С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянства потокосцеплений // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал.–2002.- №2.- С.53– 55
5. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт “DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА №4065). Киев: Министерство образования и науки Украины, Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
6. Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // Электромашинобуд. та электрообладн. – 2000. – Вип. 55. – С.11 – 15.
7. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 144 с.

Получено 22.03.04