

УДК 62-83-52:681.325-181.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Чепкунов Р.А., инж.

ОАО НИИ Преобразователь, г. Запорожье

69041, г. Запорожье, ул. Кремлевская, 63-а

E-mail: elnikroma@rambler.ru

У роботі описано розроблену автором математичну модель асинхронного електродвигуна. В процесі проведення досліджень на моделі виявлено електромеханічні автоколивання, а також знайдено спосіб їх подавлення.

Ключові слова: математична модель, асинхронний електродвигун, електромеханічні автоколивання.

In the given work the mathematical model of the asynchronous electric motor developed by the author is described. During the lead researches on model electromechanical self-oscillations come to light and the way of their suppression proves.

Key words: mathematical model, asynchronous electric motor, electromechanical self-oscillations.

Введение. В асинхронных электродвигателях, работающих от преобразователей частоты, возможны автоколебания тока и скорости вращения на низких частотах, в частности такие автоколебания проявились при наладке высоковольтного преобразователя частоты (ВПЧ) на насосной станции аммиакопровода «Тольятти – Одесса» [1]. Причем это было неожиданным, так как при испытаниях этого ВПЧ на заводе перед его отгрузкой на объект эксплуатации таких автоколебаний не наблюдалось. Поэтому возникла задача математического моделирования, определения закономерностей возникновения и обоснования способов подавления этих автоколебаний. При использовании для решения этой задачи наиболее распространенной модели асинхронного электродвигателя в системе MatLab [2], автоколебания получены не были. Потребовалась новая разработка математической модели асинхронного электродвигателя.

Цель работы – разработка математической модели асинхронного электродвигателя и исследование на ней электромеханических автоколебаний на низких частотах и способов их подавления.

Материал и результаты исследования. Математическая модель асинхронного электродвигателя. Асинхронный электродвигатель описывается системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{cases} U = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + L_0 \left(\frac{dI_2}{dt} + j\omega I_2 \right) e^{j\varphi}; \\ 0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + L_0 \left(\frac{dI_1}{dt} - j\omega I_1 \right) e^{-j\varphi}; \\ \varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{M - M_0}{J} = \frac{L_0 \operatorname{Im}(I_1 I_2^*) - M_0}{J}, \end{cases} \quad (1)$$

где U – напряжение, подаваемое на обмотку статора; $R_1, L_1, I_1, R_2, L_2, I_2$ – соответственно сопротивления; индуктивности и токи обмоток статора и ротора; L_0 – взаимная индуктивность обмоток статора и рото-

ра; $\varphi, \omega, \varepsilon$ – соответственно, угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение ротора; M – механический момент, создаваемый взаимодействием магнитных потоков статора и ротора; M_0 – момент нагрузки на валу электродвигателя, j – мнимая единица. Здесь напряжение статора U и токи статора I_1 и ротора I_2 являются комплексными величинами, характеризующимися не только абсолютной величиной, но и фазой.

Решить аналитически эту систему представляется крайне сложной задачей. Поэтому построим математическую модель с использованием численных методов решения систем дифференциальных уравнений.

Выразим приращения величин $I_1, I_2, \omega, \varphi$ через их текущие значения и подаваемое на обмотку статора напряжение U :

$$\begin{cases} dI_1 = \frac{U - \left(R_1 + j\omega \frac{L_0^2}{L_2} \right) I_1 + \frac{L_0}{L_2} (R_2 - j\omega L_2) I_2 e^{j\varphi}}{L_{x1}} dt \\ dI_2 = \frac{- \left(R_2 - j\omega \frac{L_0^2}{L_1} \right) I_2 + \frac{L_0}{L_1} [(R_1 + j\omega L_1) I_1 - U] e^{-j\varphi}}{L_{x2}} dt \\ d\omega = \varepsilon dt = \frac{M - M_0}{J} dt = \frac{L_0 \operatorname{Im}(I_1 I_2^*) - M_0}{J} dt \\ d\varphi = \omega dt \end{cases} \quad (2)$$

Здесь L_{x1}, L_{x2} – индуктивности рассеяния обмоток соответственно статора и ротора, в значительной мере определяемые наличием воздушного зазора между магнитопроводами статора и ротора. Их можно найти из соотношений:

$$L_{x1} = L_1 - L_0^2 / L_2; \quad L_{x2} = L_2 - L_0^2 / L_1.$$

Выражение (2) положено в основу математической модели асинхронного электродвигателя. Моде-

лирование проведено с использованием программы MathCad, позволяющей решать дифференциальные уравнения с комплексными переменными.

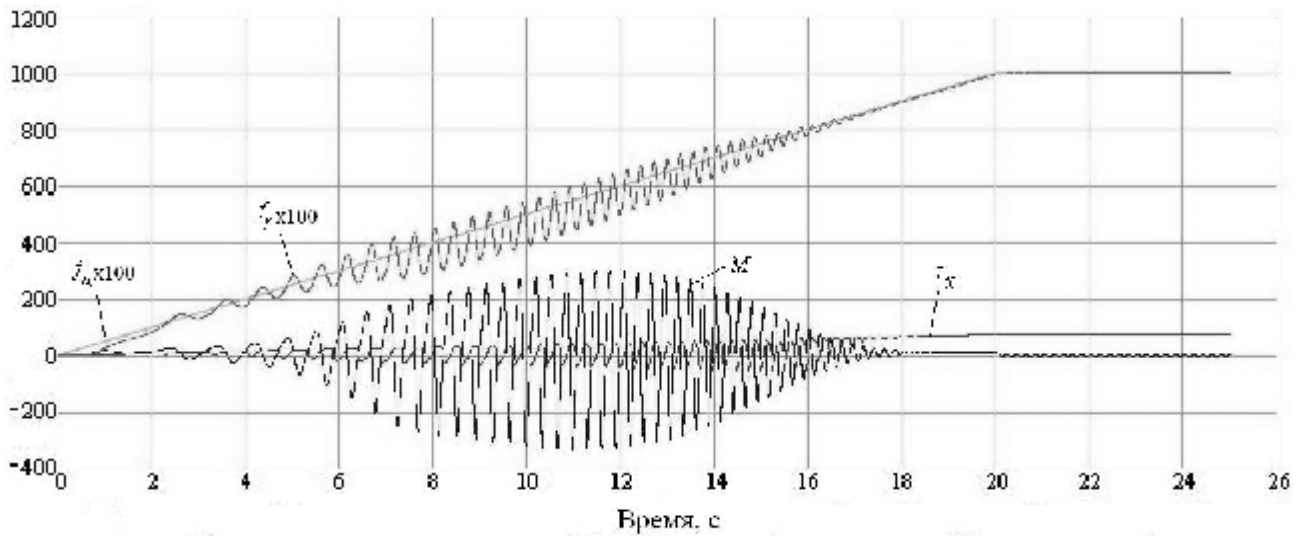
Для обнаружения автоколебаний были исследованы процессы в электродвигателе в ходе постепенного повышения частоты подаваемого напряжения. Причем амплитуда напряжения $|U|$ изменялась пропорционально частоте f с коэффициентом пропорциональности k_f :

$$|U| = k_f f .$$

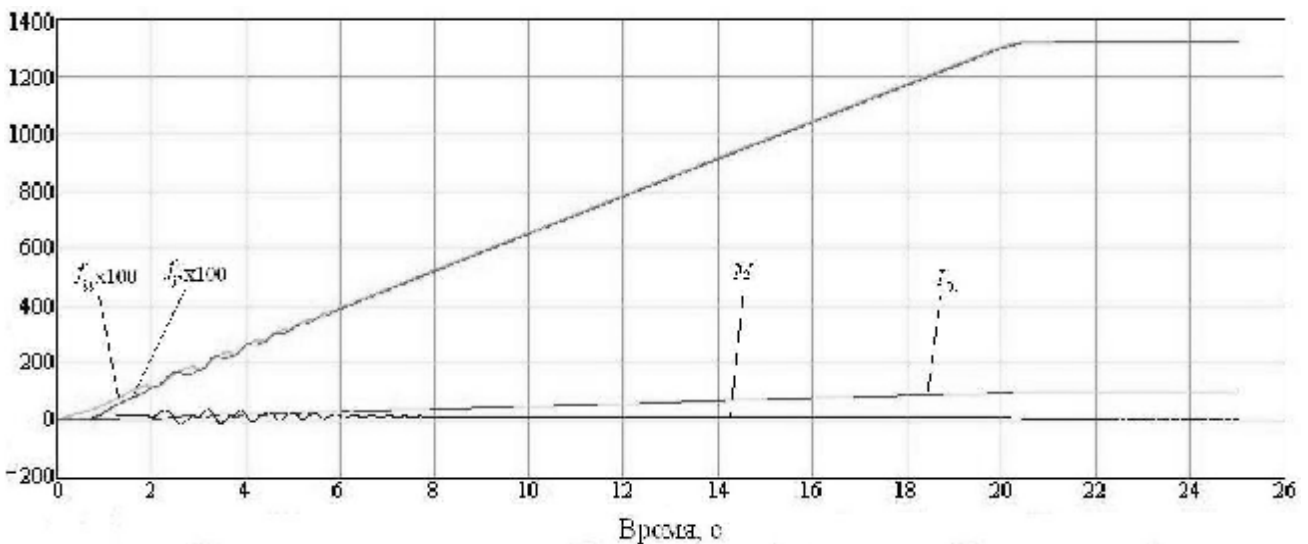
В ходе моделирования были обнаружены электромеханические автоколебания на низких частотах (рис. 1, а), что на практике и имело место при наладке преобразователей частоты, в частности, высо-

ковольтного электропривода переменного тока на перекачивающей станции аммиакопровода [1].

Для подавления автоколебаний были испробованы варианты введения обратной связи с воздействием на частоту. Наиболее эффективной оказалась положительная обратная связь по реактивной составляющей тока, введение которой устранило автоколебания (рис. 1, б). При этом увеличение частоты f_r происходит практически линейно, а изменения момента M и тока I_x - незначительны, в отличие от процесса, представленного на рис. 1, а. Моделирование также показало, что введение отрицательной обратной связи по активной составляющей тока тоже подавляет автоколебания.



а)



б)

Рисунок 1 – Результаты математического моделирования, показывающие наличие электромеханических автоколебаний в асинхронном электродвигателе на низких частотах (а) и подавление автоколебаний при введении положительной обратной связи по реактивной составляющей тока (б). Здесь f_u – частота подаваемого напряжения, f_r – частота вращения ротора, M – электромеханический момент потока сцепления ротора, I_x – реактивный ток

Однако такой способ мало приемлем из-за того, что частота электродвигателя становится зависимой от момента нагрузки на валу. Активная и реактивная составляющие тока вычислялись по мгновенным значениям токов электродвигателя в соответствии с известными формулами преобразования [4].

Определение областей устойчивости асинхронного электродвигателя. Для исследования зависимости автоколебаний от параметров электродвигателя следует минимизировать число задаваемых параметров. Для этого систему дифференциальных уравнений (2) целесообразно привести к относительным единицам.

Такую систему дифференциальных уравнений можно представить так:

$$\begin{cases} di_1 = \frac{u - (\tau_1^{-1} + jk^2\omega)i_1 + k(\tau_2^{-1} - j\omega)i_2 e^{j\varphi}}{1 - k^2} dt \\ di_2 = \frac{-(\tau_2^{-1} - jk^2\omega)i_2 + k[(\tau_1^{-1} + j\omega)i_1 - u] e^{-j\varphi}}{1 - k^2} dt, \\ d\omega = [k \operatorname{Im}(i_1 i_2^*) - \varepsilon_0] dt \\ d\varphi = \omega dt \end{cases} \quad (3)$$

где u, i_1, i_2 – приведенные значения напряжения и токов статора и ротора соответственно, τ_1, τ_2 – постоянные времени статора и ротора соответственно, ε_0 – приведенная нагрузка на валу двигателя (равно как замедление при этой нагрузке на выбеге), k – коэффициент передачи магнитного потока между статором и ротором.

Приведенные параметры определяются следующим образом:

$$u = \frac{U}{\sqrt{L_1 J}}, \quad i_1 = I_1 \sqrt{\frac{L_1}{J}}, \quad i_2 = I_2 \sqrt{\frac{L_2}{J}}, \quad \tau_1 = \frac{L_1}{R_1}, \\ \tau_2 = \frac{L_2}{R_2}, \quad k = \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad \varepsilon_0 = \frac{M_0}{J}.$$

Если учесть, что напряжение U пропорционально круговой частоте:

$$|U| = \Phi \omega_0,$$

где Φ – магнитный поток, создаваемый напряжением на статоре, то соответствующий ему приведенный параметр u будет выражаться так:

$$u = \frac{\Phi \omega_0}{\sqrt{L_1 J}} = \sqrt{\frac{R_1}{L_1}} \frac{\Phi \omega_0}{\sqrt{R_1 J}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\tau_1 \tau_M}}, \quad (4)$$

где τ_M – механическая постоянная времени, равная:

$$\tau_M = \frac{R_1 J}{\Phi^2}.$$

Исключим еще один параметр – постоянную времени статора τ_1 , приняв этот параметр за единицу измерения, минимизируя таким образом число исследуемых параметров. Тогда система (3) примет вид:

$$\begin{cases} di'_1 = \frac{u' - (1 + jk^2\omega')i'_1 + k(\tau_2'^{-1} - j\omega')i'_2 e^{j\varphi}}{1 - k^2} dt, \\ di'_2 = \frac{-(\tau_2'^{-1} - jk^2\omega')i'_2 + k[(1 + j\omega')i'_1 - u'] e^{-j\varphi}}{1 - k^2} dt, \\ d\omega' = [k \operatorname{Im}(i'_1 i_2'^*) - \varepsilon'_0] dt \\ d\varphi = \omega' dt \end{cases}, \quad (5)$$

где параметры со штрихом определяются как:

$$\tau_2' = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad \omega' = \omega \tau_1, \quad \varepsilon'_0 = \varepsilon_0 \tau_1^2, \quad t' = \frac{t}{\tau_1}, \quad i'_1 = i_1 \tau_1, \\ i'_2 = i_2 \tau_1, \quad u' = u \tau_1^2,$$

а выражение (4) примет вид:

$$u' = \frac{\omega'_0}{\sqrt{\tau'_M}},$$

где

$$\omega'_0 = \omega_0 \tau_1, \quad \tau'_M = \frac{\tau_M}{\tau_1}.$$

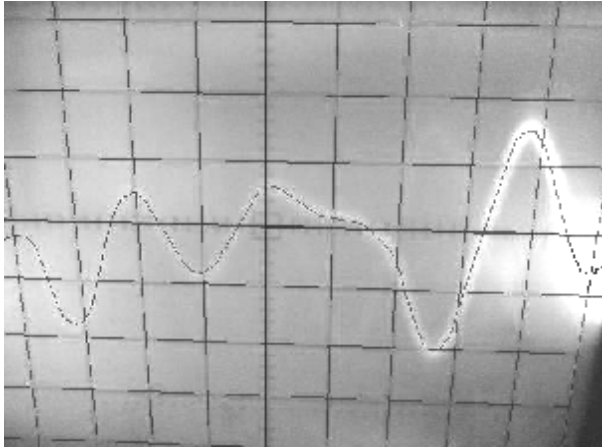
Для исследования на модели электродвигателя согласно выражению (5) была разработана программа, автоматически перебирающая варианты при изменении параметров с определенным шагом. В каждом варианте частота изменяется от нуля до номинального значения, как это представлено на рис. 1, а. При анализе вариантов определено, что автоколебания возможны только при достаточно малых индуктивностях рассеяния магнитного потока статора и ротора (коэффициент передачи магнитного потока между статором и ротором не менее 0,95) и при достаточно малых значениях относительной механической постоянной времени ($\tau'_M < 0,3$) в определенном диапазоне частот. Причем этот диапазон частот сдвигается в сторону более высоких частот при уменьшении механической постоянной времени и расширяется при уменьшении индуктивности рассеяния. Физически это объясняется тем, что фаза тока не совпадает с фазой напряжения и может изменяться относительно нее. При изменении фазы тока изменяется механический момент, действующий на ротор со стороны магнитного поля. Изменяется скорость ротора, а, следовательно, и скольжение, что снова ведет к изменению фазы тока. При малых коэффициентах передачи магнитного потока между статором и ротором автоколебания демпфируются за счет достаточно больших индуктивностей рассеяния.

Таким образом, автоколебания на низких частотах присущи не всем асинхронным электродвигателям, а с определенными коэффициентами рассеяния магнитного потока. (Поэтому и не проявились автоколебания при упомянутых выше заводских испытаниях ВПЧ).

Подавление автоколебаний воздействием на частоту положительной обратной связи по реактивной составляющей тока можно объяснить так. Реактивную составляющую тока можно рассматривать как показатель отставания фазы тока относительно фазы напряжения. При автоколебаниях фаза тока совершает колебания относительно фазы напряжения.

При воздействии на частоту положительной обратной связи по реактивной составляющей тока, а, следовательно, по отставанию фазы тока, фаза напряжения перемещается против сдвига фазы тока и тем самым демпфирует этот сдвиг. При этом фаза тока стабилизируется, и автоколебания исчезают.

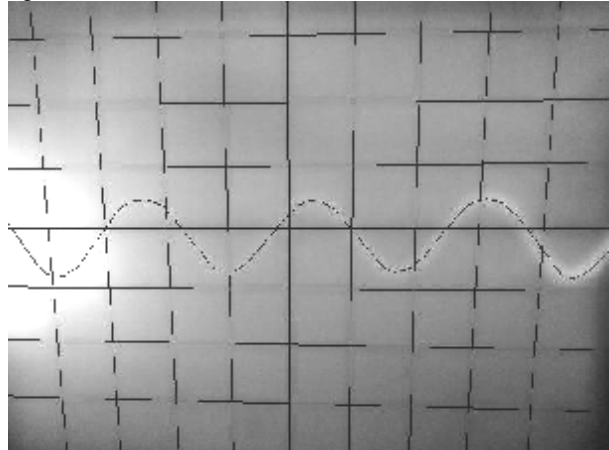
Результаты моделирования совпадают с реальными процессами в асинхронном электроприводе. В качестве подтверждения этого на рис. 2 приведены фотографии экрана осциллографа, на который выведен фазный ток электродвигателя мощностью 50 кВт на частоте 7 Гц в системе без обратной связи (рис. 2, а) и с обратной связью по реактивной со-



а)

ставляющей тока (рис. 2, б). Масштаб одной клетки по вертикали – 40 А, по горизонтали – 50 мс.

Как и показывают результаты моделирования, изменения тока в автоколебательном процессе на рис. 2,а являются следствием периодически изменяемого скольжения электродвигателя. Представленный автоколебательный процесс еще не установился, происходит постепенное раскачивание системы. При установившемся колебательном процессе ток может достигнуть аварийного значения. За счет введения обратной связи по реактивной составляющей тока величина скольжения становится постоянной (рис. 2, б).



б)

Рисунок 2 – Осциллограммы фазного тока асинхронного электродвигателя без обратной связи по реактивному току (а) и с таковой (б)

Выводы. Разработана математическая модель асинхронного электродвигателя, адекватно отражающая электромагнитные и электромеханические процессы в нем. На математической модели получены электромеханические автоколебания в асинхронном электродвигателе на низких частотах.

В результате предусматриваемого в математической модели автоматического перебора вариантов с различными параметрами асинхронного электродвигателя, было установлено, что автоколебания возможны при ограниченных сверху коэффициентах рассеяния магнитного потока электродвигателя и момента инерции ротора. Автоколебания проявляются не во всех электродвигателях и не во всех режимах их работы.

В результате моделирования показана возможность подавления автоколебаний путем введения положительной обратной связи по реактивной составляющей тока статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрієнко П.Д., Чепкунов А.І., Кражан В.С., Землянський В. В., Чепкунов Р.А. та ін. Розроблення мікропроцесорної системи і алгоритмів керування енергозберігаючим високовольтним перетворювачем частоти і регульованим електроприводом загального промислового призначення. Звіт про НД ДКР Мінпромполітики України, ВАТ НДІ «Перетворювач», Запоріжжя, 2007. № держреєстрації 0106008347. Інв. №33П2252.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – Санкт-Петербург. 2001., 320 с.
3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М., 1972.
- 4 Чепкунов А. И. Эффективное управление асинхронным электроприводом. // Технічна електродинаміка, 2006, №2, – С. 52-57.

Стаття надійшла 10.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.